



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN *ARC FLASH* MENGGUNAKAN  
METODE PERHITUNGAN MODIFIKASI DI PT. SEMEN  
INDONESIA**

Rachmad Kusuma Putra  
NRP 2212 100 046

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE141599

STUDY OF PROTECTION COORDINATION WITH  
CONSIDERING ARC FLASH USING MODIFIED CALCULATION  
METHOD AT PT. SEMEN INDONESIA

Rachmad kusuma Putra  
NRP 2212 100 046

Advisor Lecturer  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty Of Industry Technology  
Sepuluh Nopember Institute Of Technology  
Surabaya 2016

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN *ARC FLASH* MENGGUNAKAN  
METODE PERHITUNGAN MODIFIKASI DI PT. SEMEN  
INDONESIA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dr Ir. Margo Pujiantara, MT.  
NIP. 196603181990101001

Dosen Pembimbing II

Ir. Sjamsul Anam, MT.  
NIP. 196307251990031002



# **Studi Koordinasi Proteksi dengan Mempertimbangkan Arc Flash Menggunakan Metode Perhitungan Modifikasi di PT. Semen Indonesia**

**Nama Mahasiswa : Rachmad Kusuma Putra**  
**Dosen Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.**  
**Dosen Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.**

## **Abstrak**

Total beban yang ditanggung di PT. Semen Indonesia, Gresik, sangatlah besar yang mencapai 16,84 MW. Beban tersebut di suplai oleh PLN karena adanya perubahan sistem kelistrikan. Dengan adanya perubahan sistem kelistrikan pada perusahaan ini maka mempengaruhi besarnya arus hubung singkat. Namun akibat adanya gangguan hubung singkat dapat menyebabkan terjadinya busur api. Setelah dilakukan analisa didapatkan bahwa beberapa daerah di PT. Semen Indonesia, Gresik memiliki insiden energi diluar kategori 4. Maka dari itu perlu dilakukan studi koordinasi untuk keandalan pabrik, agar ketika terjadi gangguan, tidak menyebabkan *black out*. Besar energi busur api sendiri tergantung dari waktu kerja sistem pengaman ketika terjadi gangguan arus hubung singkat. Semakin cepat sistem pengaman bekerja maka dapat meminimalisir besar nilai energi busur api yang dihasilkan. Maka dilakukan Analisa busur api dengan menggunakan metode modifikasi perhitungan yang mana mempertimbangkan berkurangnya kontribusi arus hubung singkat tiap periode. Selain itu juga dipertimbangkan perhitungan kontribusi arus hubung singkat. Hasil dari pada metode modifikasi didapatkan nilai yang lebih tepat dari pada hasil perhitungan sesuai standard IEEE 1584-2002 dalam menentukan besarnya insiden energi. Setelah dilakukan beberapa analisa didapatkan bahwa beberapa daerah di PT. Semen Indonesia memiliki insiden energi pada katagori 3 yang besar energi busur api bisa dikategorikan sesuai standard NFPA 70E.

***Kata Kunci :*** *Arus hubung singkat, Insiden Energi, dan Metode Modifikasi*

## **Study of Protection Coordination with Considering Arc Flash Using Modified Calculation Method at PT. Semen Indonesia**

**Name** : Rachmad Kusuma Putra  
**Advisor I** : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
**Advisor II** : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

### **Abstract**

*Total electrical load in PT. Semen Indonesia, Gresik, is very large, which reached 16.84 MW. The load is supplied by PLN because of changes in the electrical system. With the changes in the electrical system in this company then it affects the amount of short circuit current. The effect of short circuit can cause the arc flash. After analysis it was found that some areas of PT. Semen Indonesia, Gresik has incident energy exceed of category 4. Thus it is necessary to study protection coordination, so that when a fault happens, do not cause black out. Large arc energy itself depends on the working time safety system when an interruption occurs the short circuit current. When the relay works quickly , it will make small arc energy. . Arc analysis performed using a modified calculation method which consider the short-circuit current contribution decay of each period. It is also considered the calculation of the contribution of short circuit. Results of the modified method obtained accurate than the results of the calculation according IEEE 1584-2002 standard in determining the amount of incident energy. . After some analysis it was found that some areas of PT. Semen Indonesia has incident energy 3 in order to the amount of arc flash energy could be categorized according to NFPA 70E standard.*

**Keywords :** *Short Circuit Current, Insiden Energi, dan Metode Modifikasi*

# DAFTAR ISI

<b>JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii

## **BAB I PENDAHULUAN**

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.....	4

## **BAB II SISTEM PENGAMAN TENAGA LISTRIK DAN ENERGI BUSUR API**

2.1 Gangguan Hubung Singkat.....	5
2.2 Sistem Pengaman Tenaga Listrik.....	8
2.2.1 Rele Pengaman.....	9
2.2.2 Rele Arus Lebih.....	10
2.2.3 Rele Arus Lebih Invers.....	10
2.2.4 Rele Arus Lebih Definit.....	11
2.2.5 Rele Arus Lebih Instan.....	12
2.2.6 <i>setting</i> Rele Arus Lebih.....	12
2.2.7 <i>setting</i> Rele Arus Lebih Waktu Terbalik.....	12
2.2.8 <i>setting</i> Rele Arus Lebih Seketika.....	13
2.2.9 Koordinasi Rele.....	14
2.3 Busur Api.....	15
2.3.1 Perhitungan Energi Busur Api Sesuai Standar IEEE 1584-2002.....	16
2.3.2 Perhitungan Energi Busur Api Dengan Metode Modifikasi.....	17

2.3.3	<i>Protection Boundary</i> .....	18
2.3.4	Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> .....	18
2.3.5	Pengelompokan Tingkatan Energi Busur Api Terhadap PPE ( <i>Personal Protective Equipment</i> ) ....	19

### **BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN INDONESIA (PLANT GRESIK)**

3.1	Sistem Kelistrikan di PT. Semen Indonesia ( <i>Plant Gresik</i> )	24
3.2	Relai Arus Lebih Pada Sistem Proteksi PT. Semen Indonesia ( <i>Plant Gresik</i> ) .....	24
3.2	Sistem Distribusi Listrik PT Semen Indonesia ( <i>Plant Gresik</i> ) .....	25

### **BAB IV SIMULASI DAN ANALISA BUSUR API DI PT. SEMEN INDONESIA, GRESIK**

4.1	Hasil Simulasi Energi Busur Api Menggunakan Perangkat Lunak ETAP ( <i>Existing</i> ) .....	31
4.2	Studi Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa .....	31
4.2.1	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 1 .....	32
4.2.2	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 2 .....	40
4.2.3	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3 .....	48
4.2.4	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 4 .....	54
4.3	Hasil Simulasi Energi Busur Api Menggunakan Perangkat Lunak ETAP ( <i>Resetting</i> ) .....	59
4.3.1	Perhitungan Energi Busur Api ( <i>Resetting</i> ) dengan Standar IEEE 1584-2002 .....	60
4.3.2	Perhitungan Energi Busur Api ( <i>Resetting</i> ) dengan Metode Modifikasi Perhitungan .....	62
4.4	Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> (FPB) .....	64
4.4.1	Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i> Menggunakan Software ETAP ( <i>Existing</i> ) .....	66
4.4.2	Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i> Menggunakan Software ETAP ( <i>Resetting</i> ) .....	66
4.4.3	Perhitungan FPB Berdasarkan Hasil Insiden Energi Metode Modifikasi Kondisi Setelah <i>Resetting</i> .....	67

4.5	Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi <i>Existing</i> dan Setelah <i>Resetting</i> (Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi Perhitungan) .....	68
4.6	Perbandingan Nilai <i>Flash Protection Boundary</i> (FPB) Kondisi <i>Existing</i> dan <i>Resetting</i> .....	70
4.7	<i>Personal Protective Equipment</i> (PPE) yang Harus Digunakan.....	70
 <b>BAB V PENUTUP</b>		
5.1	Kesimpulan .....	73
5.2	Saran.....	74
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		75
<b>RIWAYAT HIDUP PENULIS</b> .....		77

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Arus Hubung Singkat Simetri.....	7
<b>Gambar 2.2</b>	Arus Hubung Singkat Asimetri.....	7
<b>Gambar 2.3</b>	Arah Aliran Arus Ketika Terjadi Gangguan Hubung Singkat.....	8
<b>Gambar 2.4</b>	Skema Konsep Kerja Rele .....	9
<b>Gambar 2.5</b>	Karakteristik Kurva <i>Standard Inverse</i> , <i>Very Inverse</i> dan <i>Extremely Inverse</i> .....	11
<b>Gambar 2.6</b>	Karakteristik Kurva Rele Arus Lebih Definit .....	11
<b>Gambar 2.7</b>	Karakteristik Kurva Rele Arus Lebih Instan .....	12
<b>Gambar 2.8</b>	Rele Arus Lebih Pengaman Transformator .....	14
<b>Gambar 2.9</b>	Perbedaan <i>Arcing Fault</i> dengan <i>Bolted Fault</i> .....	16
<b>Gambar 2.10</b>	<i>Face, Head And Neck Protection</i> .....	20
<b>Gambar 2.11</b>	<i>Arc Flash Protection Clothing</i> .....	21
<b>Gambar 2.12</b>	<i>Gloves And Dielectric Footwear</i> .....	21
<b>Gambar 2.13</b>	Pengelompokan Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori .....	21
<b>Gambar 2.14</b>	Pengelompokan Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori .....	22
<b>Gambar 3.1</b>	<i>Single Line Diagram</i> PT. Semen Indonesia (Plant Gresik) .....	24
<b>Gambar 4.1</b>	Koordinasi Rele Tipikal 1 .....	32
<b>Gambar 4.2</b>	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 1 .....	33
<b>Gambar 4.3</b>	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 1 .....	39
<b>Gambar 4.4</b>	Koordinasi Rele Tipikal 2.....	40
<b>Gambar 4.5</b>	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 2 .....	41
<b>Gambar 4.6</b>	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 2.....	47
<b>Gambar 4.7</b>	Koordinasi Rele Tipikal 3.....	48
<b>Gambar 4.8</b>	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 3 .....	49
<b>Gambar 4.9</b>	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 3.....	53
<b>Gambar 4.10</b>	Koordinasi Rele Tipikal 4.....	54
<b>Gambar 4.11</b>	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 4 .....	55
<b>Gambar 4.12</b>	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 4.....	59

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Koefisien Inverse <i>Time Dial</i> .....	13
<b>Tabel 2.2</b>	Interval Waktu Koordinasi Rele.....	15
<b>Tabel 2.3</b>	Pengelompokan Domain Waktu Untuk Perhitungan Modifikasi .....	18
<b>Tabel 2.4</b>	Pengelompokan Kategori Resiko Sesuai dengan NFPA 70E.....	20
<b>Tabel 3.1</b>	Daftar Winding Transformator .....	25
<b>Tabel 3.2</b>	Data Beban Pada <i>CENTER SUSBTATION I</i> .....	27
<b>Tabel 3.3</b>	Data Beban Pada <i>CENTER SUSBTATION II</i> .....	28
<b>Tabel 3.4</b>	Data Beban Pada <i>East Susbtation I</i> .....	28
<b>Tabel 3.5</b>	Data Beban Pada <i>East Susbtation II</i> .....	28
<b>Tabel 3.6</b>	Data Beban Pada Sumberejo <i>Susbtation II</i> .....	29
<b>Tabel 4.1</b>	Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi <i>Existing</i> di PT. Semen Indonesia, Gresik .....	31
<b>Tabel 4.2</b>	Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Setelah <i>Resetting</i> di PT. Semen Indonesia, Gresik.....	60
<b>Tabel 4.3</b>	Data <i>Existing</i> Besarnya Flash Protection Boundary Hasil Simulasi ETAP.....	66
<b>Tabel 4.4</b>	Data <i>Resetting</i> Besarnya Flash Protection Boundary Hasil Simulasi ETAP.....	67
<b>Tabel 4.5</b>	Data Perbandingan Besar Insiden Energi Untuk Kondisi <i>Existing</i> dan <i>Resetting</i> .....	68
<b>Tabel 4.6</b>	Data Perbandingan Besar Insiden Energi Untuk Kondisi <i>Resetting</i> dan <i>Modified</i> .....	69
<b>Tabel 4.7</b>	Data Perbandingan FPB Kondisi <i>Existing</i> , dan <i>Resetting</i> .....	70
<b>Tabel 4.8</b>	Jenis PPE Berdasarkan Kategori Bahaya Busur Api Setelah <i>Resetting</i> .....	71

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PT. Semen Indonesia adalah salah satu perusahaan semen terbesar di Indonesia. Total beban yang ditanggung perusahaan ini sangat besar. Beban tersebut di suplai oleh PLN karena adanya perubahan sistem kelistrikan. Dengan adanya perubahan sistem kelistrikan pada perusahaan ini maka mempengaruhi besarnya arus hubung singkat. Masalah hubung singkat sering terjadi pada sistem kelistrikan di industri. Akibat adanya gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan terjadinya busur api (arc – flash). Besar energi busur api tergantung dari waktu kerja sistem pengaman ketika terjadi gangguan arus hubung singkat. Semakin cepat sistem pengaman bekerja maka dapat meminimalisir besar nilai energi busur api yang dihasilkan. Untuk mengetahui besar nilai energi busur api, perlu dilakukan pada tiap – tiap switchgear. Hal ini dilakukan karena berhubungan dengan pemilihan kategori alat perlindungan diri yang tepat agar dapat meminimalisir jatuhnya korban akibat adanya busur api. Selain itu dapat memberikan rasa aman dan nyaman bagi para pekerja.

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002 yang berkaitan tentang masalah busur api, analisa bahaya busur api harus dilakukan dengan melakukan studi terhadap hubung singkat dan koordinasi proteksi. Studi hubung singkat diperlukan untuk mendapatkan arus bolted gangguan tiga fasa. Sedangkan studi koordinasi proteksi diperlukan untuk menentukan waktu pada peralatan proteksi dalam mengisolasi ketika terjadi gangguan hubung singkat. Tetapi pada standar ini, tidak dipertimbangkan berkurangnya kontribusi arus hubung singkat pada tiap satuan waktu, dan waktu pemutusan masing – masing *Circuit Breaker* dalam melokalisir gangguan. Untuk mengkombinasikan perhitungan keduanya dalam menganalisa energi busur api tadi maka timbulah metode modifikasi yang berdasarkan pada perhitungan kontribusi arus hubung singkat dan waktu pemadaman busur api. Hal itu dapat dijadikan sebagai acuan untuk perbaikan sistem pengaman. Oleh sebab itu akan digunakan metode modifikasi dengan.

Dengan hasil analisa energi busur api yang diperoleh, akan digunakan untuk menentukan batasan jarak dari titik yang berpotensi terjadinya busur api terhadap pekerja. Selain itu juga akan ditentukan

kategori bahaya energi busur api sekaligus jenis perlindungan diri sesuai standar NFPA 70E yang dipakai oleh pekerja.

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Mensimulasikan besar energi busur api *existing* sesuai standar IEEE 1584-2002.
2. Mensimulasikan dan menghitung besar energi busur api setelah dilakukan *resetting* koordinasi proteksi sesuai standar IEEE 1584-2002.
3. Menghitung besar energi busur api dengan metode modifikasi.
4. Membandingkan antara hasil dari besar energi busur api setelah *resetting*, antara standar IEEE dengan metode modifikasi.
5. Mendapatkan dan membandingkan jarak aman pekerja pada kondisi *existing* dan *resetting*.
6. Mendapatkan kategori resiko yang ditimbulkan dari pengaruh energi busur api sesuai NFPA 70E sehingga didapat perlengkapan keselamatan diri yang cocok untuk pekerja.

## 1.3 Batasan Masalah

1. Koordinasi pengaman *overcurrent relay* yang selektif dan efektif.
2. Penentuan besar energi busur api pada masing – masing *switchgear* tegangan menengah.
3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 12.

## 1.4 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Memperoleh *setting* kurva rele pengaman yang dapat bekerja secara terkoordinasi untuk mengamankan sistem kelistrikan.
2. Memperoleh kategori level insiden energi busur api maka dapat ditentukan jenis dari perlindungan diri pekerja yang harus digunakan.
3. Dapat menentukan jarak aman pekerja untuk meminimalisir resiko terluka akibat energi busur api.

## 1.5 Metodologi

Pada Tugas Akhir ini metodologi yang digunakan penulis adalah :

1. Studi Literatur  
Mempelajari literatur yang berkaitan tentang permasalahan pada tugas akhir ini. Literatur yang digunakan menunjang tugas akhir

ini baik buku maupun jurnal. Teori – teori penunjang yang berhubungan dengan tugas akhir ini meliputi studi arus hubung singkat, koordinasi proteksi, perhitungan energi busur api mengacu standar IEEE 1584-2002, dan perhitungan energi busur api dengan metode modifikasi.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data ini dilakukan dengan mengumpulkan data-data mengenai sistem kelistrikan di PT. Semen Indonesia, Gresik, yang nantinya diperlukan dalam studi hubung singkat, koordinasi proteksi, serta busur api.

3. Pemodelan sistem kelistrikan dan simulasi

Memodelkan data – data yang diperoleh kedalam sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia, Gresik dengan *software* ETAP dan kemudian melakukan simulasi untuk mendapatkan hasil data – data yang diinginkan.

4. Analisa Data

Menganalisa hasil data dari simulasi yang telah dilakukan. Data – data yang akan dianalisa antara lain data studi arus nhubung singkat, data studi koordinasi proteksi, dan studi busur api. Analisa hubung singkat diperlukan untuk mengetahui besarnya arus hubung singkat maksimum dan minimum. Kemudian akan digunakan untuk melakukan studi koordinasi proteksi, apakah *setting* nya sudah benar atau belum. Dan studi busur api dengan melihat besarnya insiden energi dan waktu pemutusan CB berdasarkan koordinasi proteksi.

5. Penulisan Buku Tugas Akhir dan Kesimpulan

Kesimpulan merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis pada pembuatan laporan tentang apa yang telah dikerjakan. Ditekankan untuk menunjukkan hasil besarnya energi busur api dengan standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi perhitungan pada bus – bus tegangan menengah di PT. Semen Indonesia, Gresik.

## 1.6 Sistematika Penulisan

### BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan tentang latar belakang masalah, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, sistematika penulisan, dan relevansi

- BAB II : SISTEM PENGAMAN DAN ENERGI BUSUR API**  
Pada bab ini berisi teori – teori analisa hubung singkat, klasifikasi rele pengaman, kordinasi proteksi rele arus lebih, energi busur api sesuai standar IEEE 1584-2002 dan metode modifikasi perhitungan serta perlengkapan perlindungan diri sesuai NFPA 70E yang digunakan sebagai penunjang dalam tugas akhir ini.
- BAB III : SISTEM KELISTRIKAN**  
Bab ini menjelaskan mengenai sistem kelistrikan yang ada di PT. Semen Indonesia, Gresik.
- BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISA**  
Bab ini membahas mengenai analisa hasil simulasi serta menjelaskan kordinasi proteksi dan perhitungan energi busur api yang dihasilkan sesuai standar maupun dengan metode modifikasi. Serta akan dilakukan perhitungan jarak aman pekerja dan jenis perlindungan apa yang harusnya digunakan berdasarkan kategori bahaya.
- BAB V : PENUTUP**  
Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi, studi literatur dan analisa pembahasan yang telah dilakukan dari Tugas Akhir.

### **1.7 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Pembelajaran dan penyelesaian persoalan tentang energi busur api yang dihasilkan.
2. Pengelompokan klasifikasi besar energi busur api sesuai dengan perlengkapan pakaian keselamatan yang diharapkan dapat menghindari jatuhnya korban bagi para pekerja disekitarnya.
3. Memberikan kontribusi dan referensi bagi pembaca yang mengambil topik yang serupa.
4. Menjadi referensi untuk penelitian berikutnya ketika dibutuhkan informasi tentang besarnya insiden energi busur api dengan metode modifikasi perhitungan.

## **BAB II**

# **SISTEM PENGAMAN TENAGA LISTRIK DAN ENERGI BUSUR API**

Pada setiap sistem kelistrikan di suatu industri menjadi salah satu bagian yang sangat penting bagi proses produksinya. Dalam proses operasinya, listrik menyuplai peralatan – peralatan elektronik maupun mesin – mesin listrik yang digunakan untuk produksi. Apabila listrik tidak tersuplai dengan baik atau terputus akan menjadi suatu kerugian besar apabila listrik tidak tersuplai dengan baik atau terputus. Terputusnya aliran listrik biasanya disebabkan oleh adanya gangguan, baik gangguan yang bersumber dari sistem itu sendiri atau gangguan dari luar sistem. Salah satu gangguan yang paling sering terjadi pada sistem kelistrikan adalah gangguan hubung singkat. Besarnya arus gangguan hubung singkat jika melebihi *device capability* peralatan akan dapat menyebabkan panas yang berlebih pada peralatan tersebut dan dapat berakibat rusak. Gangguan hubung singkat juga bisa menyebabkan terjadinya busur api (*arc flash*) yang sangat berbahaya. Dalam Tugas Akhir ini akan dilakukan analisa terhadap besar energi busur api, yang dalam proses analisisnya merupakan kelanjutan dari studi hubung singkat dan studi koordinasi sistem proteksi[1].

### **2.1 Gangguan Hubung Singkat**

Sistem tenaga listrik dirancang untuk menjadi handal dengan desain sistem dan peralatan yang cermat, instalasi peralatan yang tepat, serta pemeliharaan peralatan secara berkala. Namun pada kenyataannya, sistem kelistrikan di industry tidak lepas dari kemungkinan adanya gangguan yang terjadi. Beberapa penyebab gangguan adalah sebagai berikut [2] :

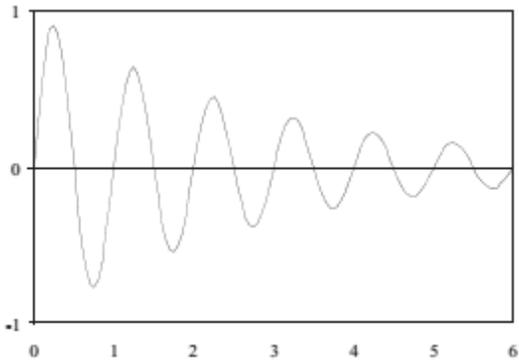
- a) Adanya hewan dalam peralatan
- b) Kerusakan isolasi karena usia
- c) Kesalahan atau kelalaian dari pada manusia
- d) Faktor alam
- e) Dan berbagai macam penyebab lainnya yang tak terduga atau belum ditentukan

Gangguan yang sering terjadi pada suatu sistem kelistrikan industri adalah gangguan hubung singkat. gangguan ini disebabkan adanya saluran fasa yang terhubung dengan saluran fasa lainnya atau terhubung

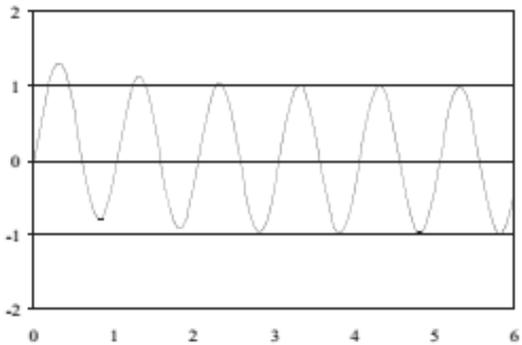
dengan ground. Ketika sebuah hubung singkat terjadi pada sistem kelistrikan, akan menimbulkan beberapa dampak antara lain arus hubung singkat akan sangat tinggi, tegangan akan menjadi drop, terputusnya aliran daya, serta timbulnya busur api dan kebakaran yang menyebabkan rusaknya peralatan. Arus hubung singkat yang tersedia didefinisikan sebagai nilai maksimum dari arus hubung singkat yang mungkin terjadi pada lokasi tertentu dengan kontribusi dari beberapa elemen (*utility*, generator, dan motor) [2].

Gelombang arus hubung singkat diklasifikasikan menjadi 2 kelompok yaitu:

1. Gangguan hubung singkat simetri.  
Gangguan hubung singkat simetri atau disebut gangguan hubung singkat seimbang yaitu terjadi pada gangguan hubung singkat tiga fasa, atau apabila nilai puncak atas dengan bawah adalah sama dilihat dari garis nol dalam satu siklus. Gambar 2.1 menunjukkan arus hubung singkat simetri
2. Gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri).  
Gangguan hubung singkat asimetri atau disebut gangguan tidak seimbang terjadi pada gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa ketanah, dan hubung singkat dua fasa. Gangguan hubung singkat ini dapat mengakibatkan arus yang sangat besar pada fasa yang mengalami gangguan dan juga dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak mengalami gangguan. Atau apabila nilai puncak atas dengan puncak bawah berbeda dilihat dari garis nol seperti Gambar 2.2. Sumbu x menunjukkan waktu dalam *cycle*.



**Gambar 2.1** Arus Hubung Singkat Simetri



**Gambar 2.2** Arus Hubung Singkat Asimetri

Adapun fase peralihan dalam hubung singkat, terdapat 3 kondisi yaitu fase peralihan subtransien, transien, dan *steady state* [4]. Untuk menentukan arus hubung singkat pada fase subtransien, maka digunakan reaktansi subtransien ( $X_d''$ ). Reaktansi ini dimiliki oleh mesin sinkron dan motor induksi. Reaktansi subtransien akan bertambah besar menjadi reaktansi transien ( $X_d'$ ). Reaktansi transien hanya dimiliki oleh mesin sinkron saja, tidak pada motor induksi. Kemudian nilainya akan meningkat menjadi reaktansi sinkron ( $X_d$ ) untuk menentukan arus hubung singkat yang mengalir setelah keadaan *steady state* tercapai.



proteksi yang terkoordinasi satu sama lain agar beroperasi secara selektif [3].

### 2.2.1 Rele Pengaman

Dalam suatu sistem tenaga listrik terdapat banyak peralatan listrik yang harganya sangat mahal. Oleh karena itu dibutuhkan suatu rele pengaman pada sistem tenaga listrik sehingga dapat mengamankan peralatan listrik yang ada. Untuk dapat mengamankan peralatan listrik yang ada maka setiap peralatan harus dilengkapi dengan peralatan pengaman.

Adapun skema dari rele pengaman sebagai berikut [4] :



**Gambar 2.4** Skema Konsep Kerja Rele

Berikut syarat-syarat pada peralatan pengaman (rele pengaman) [4]:

- a) Selektif  
Suatu rele proteksi harus mampu bekerja secara selektif, yaitu menentukan secara tepat titik gangguan berada dan memutuskan rangkaian yang terganggu dengan CB terdekat dengan gangguan yang membuka terlebih dahulu.
- b) Kecepatan Bereaksi  
Fungsi sistem proteksi adalah untuk mengisolasi gangguan secepat dan sesegera mungkin. Tujuannya adalah mengamankan kontinuitas pelayanan daya dan agar tidak merusak peralatan disekitarnya ketika terjadi gangguan.
- c) Sensitifitas  
Yaitu kemampuan rele pengaman untuk memberikan respon bila merasakan gangguan. Suatu rele disebut sensitif bila parameter operasi utamanya rendah. Misal pada rele arus lebih, rele sudah harus bekerja bila ada arus gangguan hubung singkat sekecil mungkin.
- d) Keandalan  
Rele proteksi harus mampu bekerja setiap dibutuhkan, karena jika gagal bekerja dapat mengakibatkan kerusakan yang lebih parah pada peralatan yang diamankan.

e) Ekonomis

Penggunaan dan pemilihan rele juga harus mempertimbangkan harga peralatan yang diamankan. Karena tidak semua peralatan harus dilengkapi dengan pengamanan rele yang lengkap.

### 2.2.2 Rele Arus Lebih

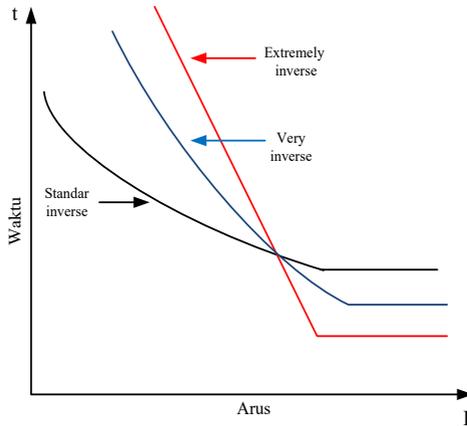
Rele arus lebih merupakan jenis rele yang paling sering digunakan. Rele akan memerintahkan *circuit breaker* untuk putus ketika jumlah arus yang mengalir melalui suatu saluran melebihi *setting* arus pada rele. Karakteristik rele arus lebih ditunjukkan secara grafis melalui kurva karakteristik arus terhadap waktu atau *Time-Current Characteristic* (TCC) [3]. Rele arus lebih akan bekerja apabila memenuhi keadaan sebagai berikut :

$$\begin{array}{ll} I_f > I_p & \text{rele bekerja} \quad (\text{trip}) \\ I_f < I_p & \text{tidak bekerja} \quad (\text{block}) \end{array}$$

Dimana  $I_p$  merupakan arus kerja dan  $I_f$  merupakan arus gangguan pada suatu sistem tenaga listrik. Rele arus lebih digunakan untuk mengamankan peralatan dari sistem tenaga listrik, seperti : generator, utility, transformator, motor, kabel, dsb.

### 2.2.3 Rele Arus Lebih Invers

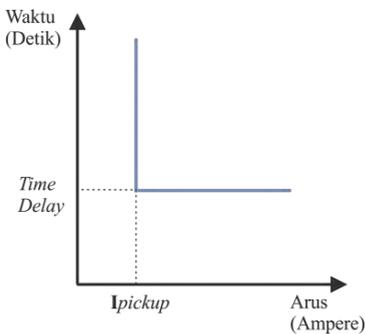
Rele ini akan bekerja dengan waktu bekerja yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*inverse time*), semakin besar arus gangguan maka semakin cepat waktu bekerjanya, dan sebaliknya. Dalam karakteristik kurva invers, yang paling umum digunakan tiga jenis kurva, yaitu kurva *inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Yang membedakan karakteristik mereka adalah waktu bekerjanya, dimana *extremely inverse* beroperasi lebih cepat dari *very inverse*, dan *very inverse* lebih cepat dari *inverse* [3].



**Gambar 2.5** Karakteristik Kurva *Standard Inverse*, *Very Inverse* dan *Extremely Inverse*

### 2.2.4 Rele Arus Lebih Definit

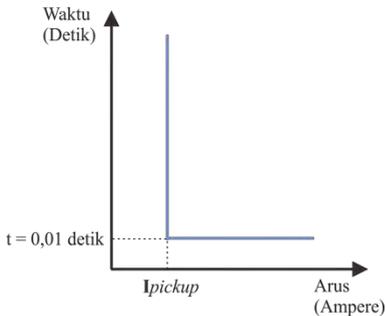
Rele arus lebih definit akan bekerja dalam waktu tertentu terlepas dari berapa besarnya arus gangguan. Rele ini akan memberikan perintah pada CB untuk trip pada saat terdapat arus gangguan yang melebihi *pick-up set point*-nya. Kurva dari rele arus lebih definit dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Karakteristik Kurva Rele Arus Lebih Definit

### 2.2.5 Rele Arus Lebih Instan

Rele arus lebih instan didesain untuk beroperasi tanpa waktu tunda yang bisa diatur. Berdasarkan referensi [5], waktu operasi tipikalnya yaitu antara  $0,5 - 2$  *cycle*. Yang mana bila dikonversi menjadi detik, berarti antara  $0,01 - 0,04$  detik. Rele ini jarang berdiri sendiri, tetapi dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik yang lain. Gambar 2.7 menunjukkan karakteristik kurva rele arus lebih instan.



**Gambar 2.7** Karakteristik Kurva Rele Arus Lebih Instan

### 2.2.6 Setting Rele Arus Lebih

Setting rele arus lebih harus disesuaikan berdasarkan koordinasi rele dengan benar. Sehingga ketika terjadi suatu gangguan pada sistem kelistrikan rele arus lebih bisa bekerja dengan cepat dan sesuai.

### 2.2.7 Setting Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Invers Time*)

Rele arus lebih waktu terbalik memiliki batas *setting* yaitu rele tidak boleh bekerja saat beban maksimum, sehingga *setting* arus dari rele ini harus lebih besar dari arus beban penuh dari peralatan yang akan diamankan. Arus beban penuh suatu peralatan listrik tergantung dari besarnya kapasitas daya, tegangan, dan power faktor dari peralatan tersebut. Pada british standard BS 142 terdapat aturan faktor pengali arus beban penuh ketika *setting* rele arus lebih yaitu  $1,05 - 1,4 I_{FLA}$ .

Pada rele arus lebih waktu terbalik terdiri dari dua bagian *setting* yaitu *setting pickup* dan *setting time dial*. Pada *pickup* besarnya arus pickup ditentukan dengan pemilihan tap. Untuk menentukan besarnya tap yang akan digunakan pada *setting pickup* menggunakan persamaan berikut :

$$T_{ap} = \frac{I_{set}}{CT_{Primary}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana  $I_{set}$  merupakan arus *pickup* dalam ampere.

Untuk mengetahui setting rele arus lebih digunakan persamaan berikut :

$$1,05 I_{FLA} < I_{set} < 1,4 I_{FLA} \dots\dots\dots (2.2)$$

Setting *time dial* digunakan untuk menentukan waktu operasi rele.

Untuk menentukan nilai *time dial* dari masing-masing kurva

karakteristik invers rele arus lebih dapat digunakan persamaan (2,2)

dibawah berikut

$$td = \frac{k \times T}{\beta \times \left[ \left( \frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right]} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

$td$  = waktu operasi (detik)

$T$  = *time dial*

$I$  = nilai arus (Ampere)

$I_{set}$  = arus *pickup* (Ampere)

$k$  = koefisien invers 1 (lihat pada tabel 2.1)

$\alpha$  = koefisien invers 2 (lihat pada tabel 2.1)

$\beta$  = koefisien invers 3 (lihat pada tabel 2.1)

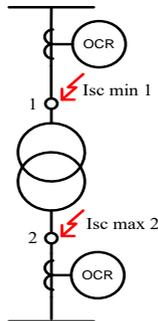
**Tabel 2.1** Koefisien *invers time dial*

Tipe Kurva	Koefisien		
	$K$	$\alpha$	$B$
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02	2,970
<i>Very Invers</i>	13,50	1,00	1,500
<i>Extremely Inverse</i>	80,0	2,00	0,808

### 2.2.8 Setting Rele Arus Lebih Seketika (*Instantaneous*)

Rele arus lebih seketika seperti yang telah dijelaskan bahwa rele ini akan bekerja seketika jika ada arus lebih yang mengalir melebihi batas yang diijinkan. Untuk menentukan *setting pickup* dari rele arus lebih seketika dengan menggunakan nilai  $I_{SC}$  min atau nilai arus hubung singkat antar fasa ( $I_{hs_{2\phi}}$ ) pada pembangkitan minimum. Persamaan 2.4 dibawah memperlihatkan setting dari rele arus lebih seketika :

$$I_{set} \leq I_{SC} \text{ min} \dots\dots\dots (2.4)$$



**Gambar 2.8** Rele Arus Lebih Pengaman Transformator

Dalam melakukan *setting* rele arus lebih seketika terdapat pertimbangan khusus pada pengaman feeder yang dipisahkan oleh sebuah transformator yang diperlihatkan pada gambar 2.8. Persamaan yang digunakan dalam menentukan setting pickup adalah sebagai berikut :

$$I_{SC \text{ max bus } 2} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{SC \text{ min bus } 1} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana nilai  $I_{sc \text{ max bus } 2}$  merupakan nilai arus hubung singkat tiga fasa maksimum ( $I_{hs_{3\phi}}$ ) pada titik 2, sedangkan  $I_{SC \text{ min bus } 1}$  merupakan arus hubung singkat minimum pada titik 1. Jika persamaan 2.5 terpenuhi maka *setting time delay* pada rele diatas transformator boleh kembali pada *time delay* 0,1.

**2.2.9 Koordinasi Rele**

Untuk mencapai selektifitas yang diinginkan, dibutuhkan koordinasi rele dengan melihat kurva karakteristik arus terhadap waktu. Dalam karakteristik arus terhadap waktu, semua peralatan proteksi harus dikoordinasikan satu sama lain. Peralatan proteksi terdekat dengan gangguan harus beroperasi terlebih dahulu. Jika peralatan ini gagal beroperasi, maka peralatan proteksi berikutnya yang harus bekerja memutuskan rangkaian. Pengaturan arus dan waktu rele dalam *single line diagram* kelistrikan, harus dimulai dari beban terakhir atau terbawah dan kembali ke atas menuju generator ataupun *utility*. Setelan arus harus diatas arus maksimum beban penuh dan pastikan peralatan proteksi beroperasi pada arus hubung singkat minimum.

Ketika mengplot kurva arus – waktu, pastikan rele bekerja secara selektif dengan cara melihat bahwa tidak adanya titik yang *overlap* antara kurva rele yang satu dengan rele yang lain dan interval waktu yang tidak terlalu lama atau terlalu cepat [3].

Untuk koordinasi yang tepat, selisih waktu antara rele utama dengan rele back up ditentukan berdasarkan IEEE STD 242 dapat dilihat pada Tabel 2.2 [5].

**Tabel 2.2** Interval Waktu Koordinasi Rele

<b>Komponen</b>	<b>Rele Konvensional</b>	<b>Rele Digital Berbasis Mikroprosesor</b>
Waktu Membuka Circuit Breaker (2 – 5 Cycle)	0,04 – 0,1 detik	0,04 – 0,1 detik
<i>Relay Overtravel</i>	0,1 detik	0 detik
Toleransi rele dan eror <i>setting</i>	0,12 detik	0,12 detik
Total Interval Waktu	0,32 detik	0,22 detik

Ketika digunakan rele digital, maka *overtravel* rele dapat dihilangkan. Sehingga interval rele biasanya digunakan antara 0,2 sampai 0,4 detik.

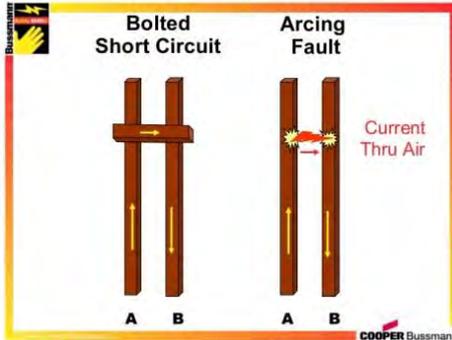
### 2.3 Busur Api

Energi busur api adalah hasil dari suatu pelepasan energi yang cepat yang disebabkan karena arcing fault diantara satu busbar dengan busbar lainnya , netral atau ground [4]. *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. Gambar 2.9 menunjukkan perbedaan *arc fault* dengan *bolted fault* [7].

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, uap dan dapat mencelakai pekerja.

Penting untuk memprediksi besarnya energi yang dihasilkan pada suatu bus akibat busur api. Beberapa variabel yang mempengaruhinya

meliputi arus *bolted fault* atau arus hubung singkat maksimum, waktu peralatan proteksi untuk menghilangkan gangguan, jarak antar konduktor, tegangan sistem, dan jarak titik *arc* ke pekerja [8].



**Gambar 2.9** Perbedaan *Arcing Fault* dengan *Bolted Fault*

### 2.3.1 Perhitungan Energi Busur Api Sesuai Standar IEEE 1584-2002

Pada sistem tegangan menengah, dalam memperoleh nilai insiden energi busur api menurut standar IEEE 1584-2002 yang terlebih dahulu dilakukan adalah mendapatkan nilai arus *arcing* [1].

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (2.4)$$

Dimana :

$\lg$  adalah  $\log_{10}$

$I_a$  adalah arus *arcing* (kA)

$I_{bf}$  adalah arus *bolted* gangguan tiga fasa (simetris RMS) (kA)

Setelah mendapatkan arus *arcing*, kemudian menghitung insiden energi normalisasi dengan persamaan 2.5.

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011G \quad (2.5)$$

Dimana :

$E_n$  adalah insiden energi normalisasi (cal/cm<sup>2</sup>)

$K_1$  adalah konstanta yang bernilai  $-0,792$  untuk konfigurasi peralatan terbuka dan bernilai  $-0,555$  untuk konfigurasi peralatan tertutup (dengan *box*)

- $K_2$  adalah konstanta yang bernilai 0 untuk sistem yang tidak ditanahkan atau sistem dengan pentanahan tahanan tinggi, dan bernilai  $-0,113$  untuk sistem yang ditanahkan
- $G$  adalah jarak antar konduktor

Insiden energi saat tegangan  $< 15$  kV diperoleh dengan persamaan 2.6.

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (2.6)$$

Dimana :

- $E$  adalah insiden energi ( $J/cm^2$ )
- $C_f$  adalah faktor perhitungan. Bernilai 1.0 untuk tegangan diatas 1 kV, dan bernilai 1.5 untuk tegangan dibawah 1 kV
- $t$  adalah waktu *arc*ing (detik)
- $D$  adalah jarak dari titik *arc* ke pekerja (mm)
- $x$  adalah eksponen jarak

Dan yang terakhir, insiden energi saat tegangan  $> 15$  kV diperoleh dengan persamaan 2.7.

$$E = 2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (2.7)$$

Dimana :

- $E$  adalah insiden energi ( $J/cm^2$ )
- $V$  adalah besar tegangan bus (kV)
- $I_{bf}$  adalah arus *boltd* gangguan tiga fasa(simetris RMS) (kA)
- $t$  adalah waktu *arc*ing (detik)
- $D$  adalah jarak dari titik *arc* ke pekerja (mm)

### 2.3.2 Perhitungan Energi Busur Api Dengan Metode Modifikasi

Metode modifikasi perhitungan untuk insiden energi busur api merupakan pengembangan dari pada metode sesuai standar IEEE 1584-2002. Dalam metode modifikasi dipertimbangkan berkurangnya arus gangguan tiga fasa dan juga waktu pemutusan masing – masing *circuit breaker* dalam menghilangkan gangguan (*Arc Clearing Time*) [8].

Untuk perhitungannya, digunakan pengelompokan domain waktu berdasarkan konstanta waktu tipikal mesin berputar untuk fase peralihan hubung singkat tertentu. Adapun domain waktu tersebut sebagai berikut seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Sedangkan perhitungan insiden energi total merupakan penjumlahan dari insiden energi tiap domain waktu sebagai berikut :

$$E_{\text{total}} = E_{0.035\text{sec}} + E_{0.08\text{sec}} + E_{0.8\text{sec}} + E_{t\text{sec}} \quad (2.7)$$

**Tabel 2.3** Pengelompokan Domain Waktu Untuk Perhitungan Modifikasi

Domain Waktu	Fase Perlahan
0 – 0,035	<i>Subtransient</i>
0,035 – 0,8	<i>Transient</i>
0,8 – t ( <i>Arc Clearing Time</i> )	<i>Steady State</i>

### 2.3.3 Protection Boundary

*National Fire Protection Association* (NFPA) telah mengembangkan sebuah pendekatan dalam menentukan batasan – batasan khusus yang dirancang untuk melindungi pekerja saat bekerja pada atau dekat peralatan yang bertegangan [7]. Ada 4 batasan perlindungan yang ditetapkan, yaitu :

1. *Flash Protection Boundary*

Batas pendekatan dari sebuah jarak bagian listrik yang tidak terisolasi sampai pekerja yang dapat menerima luka bakar tingkat dua.

2. *Limited Approach Boundary*

Pendekatan terhadap batasan jarak dari konduktor listrik bertegangan atau bagian rangkaian yang mana terdapat bahaya sengatan listrik.

3. *Restricted Approach Boundary*

Pendekatan terhadap batasan jarak dari konduktor listrik bertegangan dimana ada peningkatan risiko terkena sengatan listrik, karena busur api dikombinasikan dengan gerakan yang tidak disengaja.

4. *Prohibited Approach Boundary*

Pendekatan terhadap batasan jarak dari konduktor listrik bertegangan dimana pekerja dianggap memiliki kontak langsung dengan konduktor listrik.

### 2.3.4 Perhitungan Flash Protection Boundary

Dalam menentukan batasan perlindungan busur api, diperlukan suatu perhitungan agar mengetahui batasan aman bagi pekerja terhadap peralatan bertegangan. Berikut persamaannya untuk tegangan 1-15 kV sesuai standar IEEE 1584-2002 [1]:

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) \left( \frac{610^8}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.8)$$

Dimana :

$D_B$  adalah jarak batasan dari titik *arcing* (mm)

$t$  adalah waktu (detik)

$E_B$  adalah insiden energi dalam  $J/cm^2$  pada jarak batasan. Dapat di set pada nilai  $5.0 J/cm^2$

Dan persamaan untuk  $> 15$  kV adalah :

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times Ibf \times \left( \frac{t}{E_B} \right)} \quad (4.10)$$

Dengan :

$E$  = Insiden Energi ( $cal/cm^2$ )

$E_B$  = insiden energi dalam  $J/cm^2$  pada jarak batasan. Dapat di set pada nilai  $5.0 (J/cm^2)$

$t$  = waktu FCT (s)

$Ibf$  = arus *bolted* gangguan tiga fasa(simetris RMS) (kA)

### 2.3.5 Pengelompokan Tingkatan Energi Busur Api Terhadap PPE (*Personal Protective Equipment*)

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 2.4 menunjukkan klasifikasi resiko yang mengacu pada standar NFPA 70E berdasarkan referensi [9]. 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 2.4** Pengelompokan Kategori Resiko Sesuai dengan NFPA 70E

<b>Kategori</b>	<b>Level Energi (Cal/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>PPE – PPC yang Dibutuhkan</b>
<b>0</b>	< 2	Bahan yang tidak meleleh, mudah terbakar (Contoh : kain katun, wol, sutra, atau campuran bahan – bahan)
<b>1</b>	2 – 4	Pakaian dan celana yang tahan api
<b>2</b>	4 – 8	Pakaian dalam dengan kain katun, serta pakaian luar dan celana yang tahan api
<b>3</b>	8 – 25	Pakaian dalam kain katun ditambah baju dan celana yang tahan api ditambah pakaian tahan api yang mencakup seluruh tubuh
<b>4</b>	25 – 40	Pakaian dalam katun ditambah baju dan celana tahan api ditambah mantel dan celana tahan api double layer



**Gambar 2.10** Face, Head And Neck Protection[3]



**Gambar 2.11** Arc Flash Protection Clothing [3]



**Gambar 2.12** Gloves And Dielectric Footwear[3]

Adapun tampilan pengelompokan alat perlindungan diri berdasarkan kategori seperti Gambar 2.13 berdasarkan referensi [10].



**Gambar 2.13** Pengelompokan Alat Perlindungan Diri Berdasarkan a) Kategori 0; b) Kategori 1; c) Kategori 2



**Gambar 2.14** Pengelompokan Alat Perlindungan Diri Berdasarkan d) Kategori 3; e) Kategori 4

## **BAB 3**

### **SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN INDONESIA (PLANT GRESIK)**

#### **3.1 Sistem Kelistrikan PT. Semen Indonesia (Plant Gresik)**

Pada PT. Semen Indonesia (*Plant Gresik*) mempunyai sistem kelistrikan yang cukup kompleks karena di suplai oleh PLN dari Gardu Induk Segoromadu dengan tegangan suplai 70 kV. Sistem Distribusi kelistrikan PT. Semen Indonesia di pabrik Gresik adalah sebagai berikut:

- a. Jaringan utama dari *main substation* sebesar 70 kV PLN diturunkan ke tegangan distribusi 20 kV dengan transformator *step down*.
- b. Jaringan dari *main substation* sebesar 20 kV ke tegangan 2,4 kV dengan transformator *step down* yang akan digunakan suplai untuk *electrical room* yang ada.
- c. Jaringan dari *electrical room* 2,4 kV tersebut di turunkan menggunakan transformator *step up* ke tegangan rendah menjadi 0,4 dan 0,38 kV
- d. Jaringan beban untuk keperluan monitoring dilayani dengan tegangan 0,22 kV dan 0,11 kV

Proses produksi semen di Pabrik Gresik saat ini terdiri dari *Finish mill, Packing plant* dan pelabuhan.

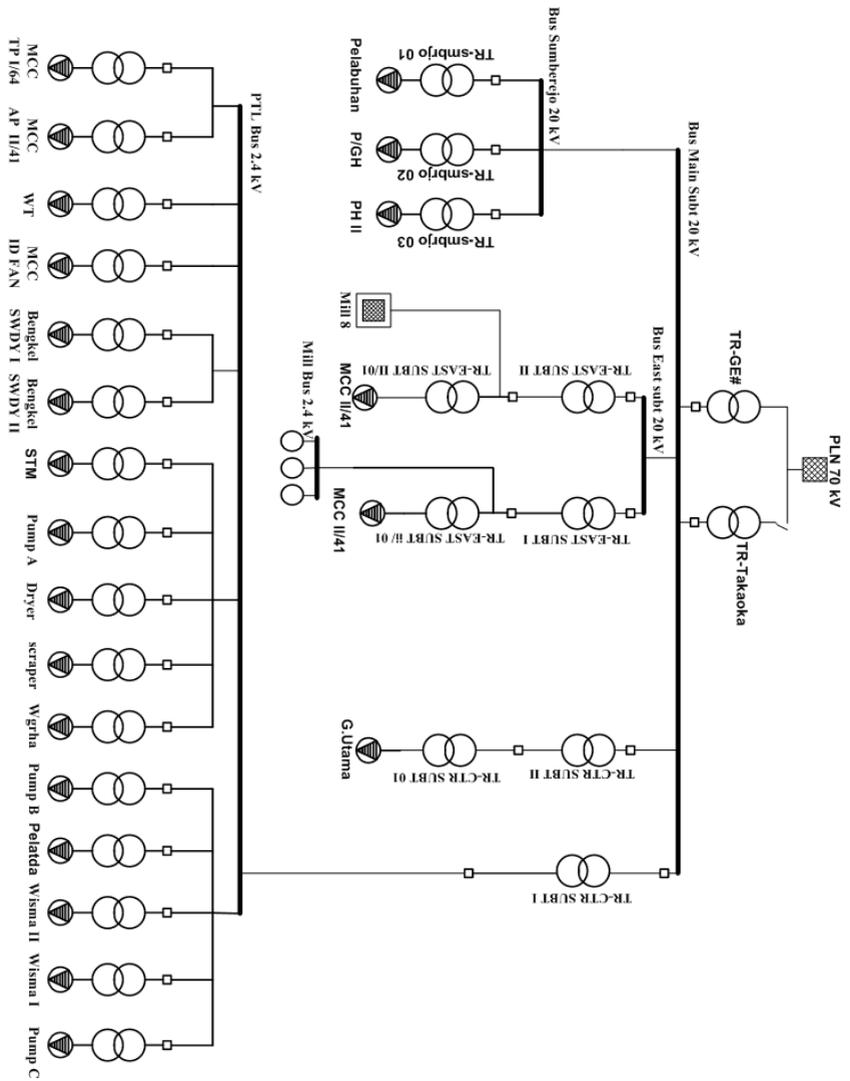
Secara sistematis sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia (*Plant Gresik*) dapat digambarkan pada Gambar 3.1.

#### **3.2 Relai Arus Lebih Pada Sistem Proteksi PT. Semen Indonesia (Plant Gresik) :**

Dengan sistem kelistrikan yang kompleks tersebut maka pada sistem proteksinya harus mempunyai tingkat kehandalan yang tinggi untuk mengatasi gangguan yang terjadi, dalam mengamankan sistem kelistrikannya. PT.Semen Indonesia menggunakan pengaman Rele arus lebih dengan *merk* buatan Amerika dengan *manufactur* antara lain :

- a. Westinghose tipe COH
- b. GE Multilin tipe IJCV
- c. GE Multilin tipe IAC-51A

Untuk jenis rele yang digunakan merupakan rele dengan sistem mekanik/konvensional, karena rele ini mempunyai umur yang sangat lama.



**Gambar 3.1** Single Line Diagram PT. Semen Indonesia (Plant Gresik)

### 3.3 Sistem Distribusi Listrik PT Semen Indonesia (*Plant Gresik*)

Dengan sistem kelistrikan yang cukup kompleks maka diperlukan peralatan-peralatan yang handal dan berkualitas untuk menjamin kontinuitas proses produksi di PT.Semen Indonesia di pabrik Gresik. Aliran distribusi daya dari *main substation* ini didukung oleh beberapa transformator daya untuk mensuplai beban dengan beberapa rating tegangan. Berikut daftar transformator pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Daftar Winding Transformator

NO	TRAFO	Rating				
	ID TRAFO	MVA	Primer (kV)	Sekunder (kV)	% Z	X/R
1	TR-GE#	24	70	20	10	20
2	TR- MainSubt Smbjo	3,75	20	2,4	6,25	6
3	TR-smbjo 01	1,6	20	0,4	6,25	6
4	TR-smbjo 02	0,25	20	0,4	4	1,5
5	TR-smbjo 03	1,5	2,4	0,48	6,25	6
6	TR-smbjo 04	0,85	2,4	0,4	6,25	6
6	TR-EAST SUBT II	3,75	20	2,4	7,15	8,5
7	TR-EAST SUBT II/01	1	2,4	0,48	5	3,5
9	TR-EAST SUBT I	10,5	20	2,4	8,35	13

**Tabel 3.1** Daftar Winding Transformator (lanjutan)

NO	TRAFO	Rating				
	ID TRAFO	MVA	Primer (kV)	Sekunder (kV)	% Z	X/R
10	TR-EAST SUBT I/01	1,6	2,4	0,48	6,25	6
11	TR-CTR SUBT II	5	20	2,4	7,15	8,5
12	TR-CTR SUBT II/01	2	2,4	0,4	6,25	6
13	TR-CTR SUBT I	2	20	2,4	8,35	13
14	TR-CTR I/01	0,75	2,4	0,44	5	3,5
15	TR-CTR I/02	1,6	2,4	0,44	6,25	6
16	TR-CTR I/03	0,75	2,4	0,44	5	3,5
17	TR-CTR I/04	0,02	2,4	0,22	4	1,5
18	TR-CTR I/05	0,75	2,4	0,44	5	3,5
19	TR-CTR I/06	0,75	2,4	0,48	5	3,5
20	TR-CTR I/07	0,006	2,4	0,44	4	1,5
21	TR-CTR I/08	0,05	2,4	0,44	4	1,5
22	TR-CTR I/09	0,016	2,4	0,48	4	1,5
23	TR-CTR I/10	0,025	2,4	0,38	4	1,5
24	TR-CTR I/11	1	2,4	0,48	5	3,5

**Tabel 3.1** Daftar Winding Transformator (lanjutan)

NO	TRAFO	Rating				
	ID TRAFO	MVA	Primer (kV)	Sekunder (kV)	% Z	X/R
25	TR-CTR I/12	1	2,4	0,48	5	3,5
26	TR-CTR I/13	0,02	2,4	0,48	4	1,5
27	TR-CTR I/14	1,6	2,4	0,4	6,25	6
28	TR-CTR I/15	0,0025	2,4	0,38	4	1,5
29	TR-CTR I/16	0,025	2,4	0,22	4	1,5
30	TR-CTR I/17	0,04	2,4	0,22	4	1,5
31	TR-CTR I/18	0,016	2,4	0,22	4	1,5
32	TR-CTR I/119	0,0075	2,4	0,48	4	1,5

### 3.1 Kapasitas Beban Pada Sistem Kelistrikan Pabrik III

Pada sistem kelistrikan PT Semen Indonesia (*Plant* Gresik) terdapat beberapa beban. Beban-beban ini terbagi menjadi beberapa substasion. Tabel 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, dan 3.6 memperlihatkan data kapasitas beban dari beberapa substation.

**Tabel 3.2** Data Beban Pada *CENTER SUSBTATION I*

No	ID Beban	kV	KVA
1	MCC TP I/64	0,44	300
2	MCC ID FAN	0,44	300
3	MCC AP II/41	0,44	640
4	WT	0,44	300
5	Bengkel SWDY I	0,44	400
6	Bengkel SWDY II	0,44	200
7	STM	0,44	64

**Tabel 3.2** Data Beban Pada *CENTER SUSBTATION I* (lanjutan)

No	ID Beban	kV	KVA
8	Pump A	0,44	100
9	Dryer	0,44	400
10	scraper	0,44	400
11	Wgrha	0,44	80
12	Pump B	0,44	64
13	Pelatda	0,38	10
14	Wisma II	0,22	64
15	Wisma I	0,22	100
16	Pump C	0,44	30
17	Diklat	0,22	160
18	Alat Berat	0,4	640

**Tabel 3.3** Data Beban Pada *CENTER SUSBTATION II*

No	ID Beban	kV	KVA
1	GEDUNG UTAMA	0,4	800

**Tabel 3.4** Data Beban Pada *East Susbtation I*

No	ID Beban	kV	KVA
1	MCC II/41	0,48	640
2	MILL A	2,4	2534
3	MILL B	2,4	2534
4	MILL C	2,4	2534

**Tabel 3.5** Data Beban Pada *East Susbtation Ii*

No	ID Beban	kV	KVA
1	MCC II/42	0,44	400
2	Mill-1	2,4	520
3	Mill-2	2,4	520
4	Mill-3	2,4	262
5	Mill-4	2,4	520
6	Mill-5	2,4	520

**Tabel 3.6** Data Beban Pada Sumberejo *Susbtation li*

No	ID Beban	kV	KVA
1	PELABUHAN	0,4	640
2	LJ/GH	0,4	100
3	PH II	0,48	600

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## BAB IV

### SIMULASI DAN ANALISA BUSUR API DI PT. SEMEN INDONESIA, GRESIK

#### 4.1 Hasil Simulasi Energi Busur Api Menggunakan Perangkat Lunak ETAP (*Existing*)

Simulasi pada perangkat lunak ETAP menggunakan perhitungan berdasarkan standar IEEE 1584-2002. Simulasi dilakukan pada level tegangan menengah 20 kV dan 2,4 kV di sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia, Gresik. Pada sub bab ini, akan ditampilkan data hasil simulasi besarnya energi busur api pada bus – bus dengan kondisi koordinasi proteksi *existing*. Data – data tersebut berisikan Bus ID, besarnya arus *bolted fault*, arus *arcing*, FCT (*Fault Clearing Time*), Insiden Energi, dan kategori bahaya. Data tersebut akan ditampilkan pada tabel 4.1, dimana level tegangan bus – busnya pada tegangan menengah, dan yang termasuk pada kategori 4 dan lebih dari kategori 4

**Tabel 4.1** Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi *Existing* di PT. Semen Indonesia, Gresik

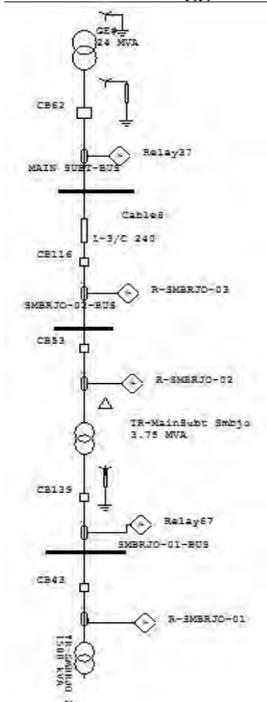
Bus ID	Arus Bolted Fault (kA)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori
MAIN SUBT-BUS	8,92	8,63	0,917	100,22	> Kategori 4
SMBRJO-02-BUS	8,63	8,92	0,372	39,35	Kategori 4
EAST-SUBT-03	8,66	8,66	0,571	60,62	> Kategori 4
EAST-SUBT-02	35,4	33,63	0,430	49,26	> Kategori 4
PTL-MAIN-BUS	23,58	22,55	1,069	79,56	> Kategori 4

#### 4.2 Studi Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

Studi koordinasi rele arus lebih gangguan fasa disini digunakan untuk mengetahui waktu pemutusan CB ketika terjadi gangguan busur api. Ketika terjadi gangguan busur api, rele tetap harus dapat bekerja

secara selektif dalam melokalisasi gangguan. Langkah pertama untuk melakukan studi koordinasi rele arus lebih gangguan fasa adalah harus menganalisa terlebih dahulu kondisi *existing* pengamanan. Analisa dilakukan dengan membuat plot rele – rele pada kurva TCC (*Time Current Curve*) pada *software* simulasi. Sehingga apabila rele tidak terkoordinasi dengan baik, maka diperlukan *resetting* pada rele arus lebih.

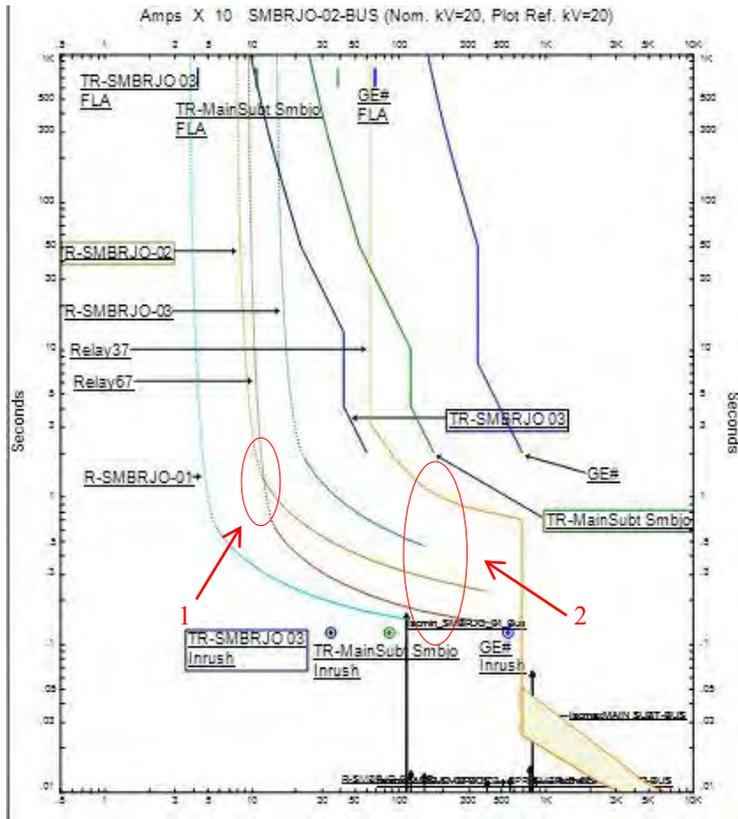
#### 4.2.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 1



**Gambar 4.1** Koordinasi Rele Tipikal 1

Tipikal 1 ini merupakan koordinasi sistem pengamanan dari sekunder trafo GE# dengan rating 24 MVA hingga trafo TR-SMBRJO 2. Trafo TR-SMBRJO 2 dengan rating 1500 kVA. Rele – rele yang di koordinasikan yaitu rele 67, rele R-SMBRJO-02, rele R-SMBRJO-03, dan rele 37. *Single Line Diagram* untuk tipikal 1 dapat dilihat pada

Gambar 4.1. Sedangkan untuk data plot rele kondisi *existing* untuk tipikal 1 dapat dilihat pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 1

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 1, dapat dilihat bahwa masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat. Diantaranya pada lingkaran yang ditunjukkan oleh nomor 1, bahwa kurva rele R-SMBRJO-02 *overlap* dengan kurva rele67. Kemudian lingkaran yang ditunjukkan oleh nomor 2, menunjukkan bahwa waktu *delay* yang melebihi waktu *delay* yang diperbolehkan, yaitu antara 0,2 – 0,4 detik.

Dengan hasil analisa koordinasi rele kondisi *existing* tipikal 1 diatas, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele pengaman. Berikut perhitungannya :

➤ **Rele SMBRJO-01**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : *Standart Inverse*  
*CT Ratio* : 400 / 5  
 Iscmin SMBRJO-01-BUS : 9,44 kA  
 Iscmax SMBRJO-01-BUS: 10,07 kA  
 FLA Primer TR-smbrjo-2 : 360,8 A

*Time Overcurrent Pickup (Low set)*

$$1,05 \times FLA \leq Iset \leq 1,4 \times FLA$$

$$\frac{1,05 \times FLA}{\frac{nCT}{400}} \leq Tap \leq \frac{1,4 \times FLA}{\frac{nCT}{400}}$$

$$4,735 \leq Tap \leq 6,314$$

Dipilih Tap = 5

$$Iset = 400 \text{ A}$$

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = Td \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{Iscmax}{Ipickup} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$

$$0,1 = Td \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{10070}{400} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$Td = 0,1$$

**dipilih Td = 0,5**

➤ **Rele 67**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : *Standart Inverse*

*CT Ratio* : 800 / 5  
 Iscmin SMBRJO-01-BUS : 9,44 kA  
 Iscmax SMBRJO-01-BUS : 10,07 Ka  
 FLA Primer TR-smbrho-2, 2-1 : 565,3 A

Time Overcurrent Pickup (Low set)

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

$$\frac{1,05 \times FLA}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{1,4 \times FLA}{n_{CT}}$$

$$\frac{1,05 \times 565,3}{\frac{800}{5}} \leq Tap \leq \frac{1,4 \times 565,3}{\frac{800}{5}}$$

$$3,94 \leq Tap \leq 5,26$$

Dipilih Tap = 4

$$I_{set} = 800 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,3 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^a - 1 \right]} \right\}$$

$$0,3 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{10070}{800} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,272$$

**dipilih Td = 1,85**

➤ **Rele SMBRJO-02**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : Standart Inverse  
*CT Ratio* : 100 / 5  
 Iscmin SMBRJO-02-BUS : 5,75 KA  
 Iscmax SMBRJO-02-BUS : 6,99 KA  
 Iscmax SMBRJO-01-BUS : 10,07 KA  
 FLA Primer TR-SMBRJO 2 : 86,6 A

Time Overcurrent Pickup (Low set)

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{n_{\text{CT}}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA}}{n_{\text{CT}}}$$

$$\frac{1,05 \times 86,6}{\frac{100}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times 86,6}{\frac{100}{5}}$$

$$4,54 \leq \text{Tap} \leq 6,06$$

Dipilih Tap = 5

$$\text{Iset} = 100 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{\text{scmax}}}{I_{\text{pickup}}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$

$$0,1 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{6990}{100} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,053$$

**Dipilih Td = 3,6**

➤ **Rele SMBRJO-03**

*Manufacturer* : GE Multilin

*Model* : IAC-51A

*Curve Type* : *Standart Inverse*

*CT Ratio* : 150 / 5

Iscmin MAIN SUBT-BUS : 5,9 KA

Iscmax MAIN SUBT-BUS : 7,21 KA

FLA gabungan : 140 A

Time Overcurrent Pickup (Low set)

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{n_{\text{CT}}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA}}{n_{\text{CT}}}$$

$$\frac{1,05 \times 140}{\frac{150}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times 140}{\frac{150}{5}}$$

$$4,9 \leq \text{Tap} \leq 6,53$$

Dipilih Tap = 5

$$\text{Iset} = 150 \text{ A}$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,3 s

$$t = Td \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$
$$0,3 = Td \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{8130}{150} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$Td = 0,175$$

**dipilih Td = 3,62**

### ➤ Rele 37

<i>Manufacturer</i>	: GE Multilin
<i>Model</i>	: IJCV
<i>Curve Type</i>	: Standart Inverse (0%)
<i>CT Ratio</i>	: 800 / 5
Iscmin MAIN SUBT-BUS	: 5,9 kA
Iscmax MAIN SUBT-BUS	: 7,21 kA
FLA Gabungan	: 692,8 A

### Time Overcurrent Pickup (Low set)

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

$$\frac{1,05 \times \text{FLA Trafo}}{\frac{nCT}{800}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA Trafo}}{\frac{nCT}{800}}$$

$$4,55 \leq \text{Tap} \leq 6,062$$

Dipilih Tap = 5

$$I_{set} = 800 \text{ A}$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0.5 s

$$t = \frac{K \times Td}{\beta \times \left[ \left( \frac{1}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}$$
$$Td = \frac{t \times \beta \times \left[ \left( \frac{1}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}{K}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[ \left( \frac{I_{sc \text{ max main subt-bus}}}{\text{tap} \times nCT} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,5 \times 2,97 \times \left[ \left( \frac{7210}{5 \times \frac{800}{5}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,524$   
**dipilih  $T_d = 3,62$**

*Instantaneous Pickup*

$$1,6 \times FLA < I_{>>} < 0,8 \times I_{scmin}$$

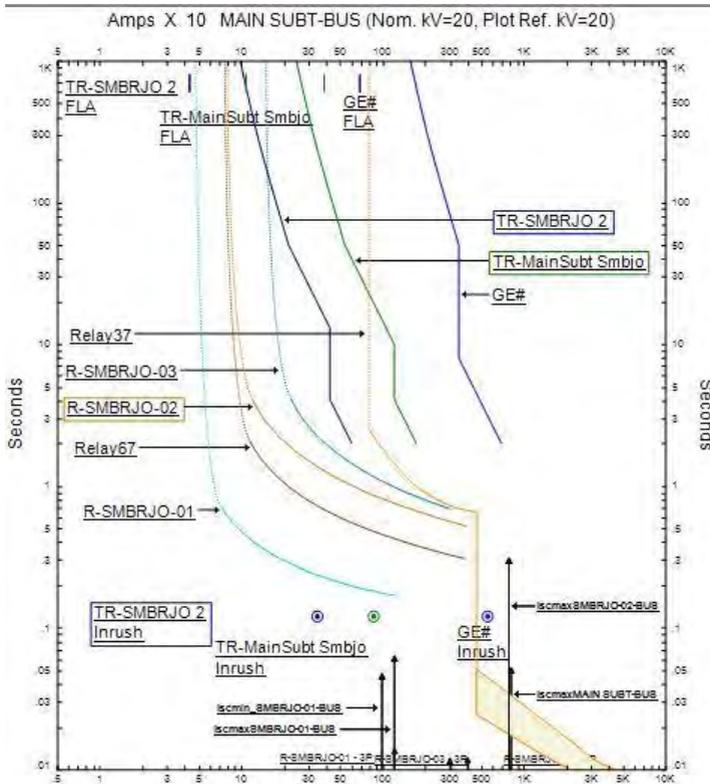
$$1,6 \times 692,8 < I_{>>} < 0,8 \times 5900$$

$$1108,48 < I_{>>} < 4720$$

$$\frac{1108,48}{800/5} < \text{Tap} < \frac{4720}{800/5}$$

$$6,92 < \text{Tap} < 29,5$$

**Dipilih Tap = 29**

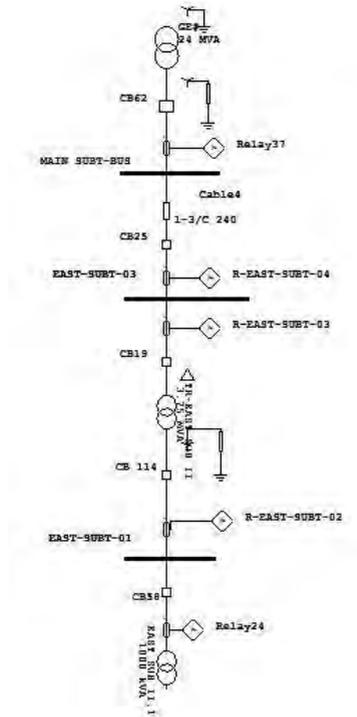


**Gambar 4.3** Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 1

Dengan menggunakan hasil perhitungan tersebut, maka dapat di plot kurva arus waktu untuk kondisi setelah *resetting* menggunakan perangkat lunak ETAP. Dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.3.

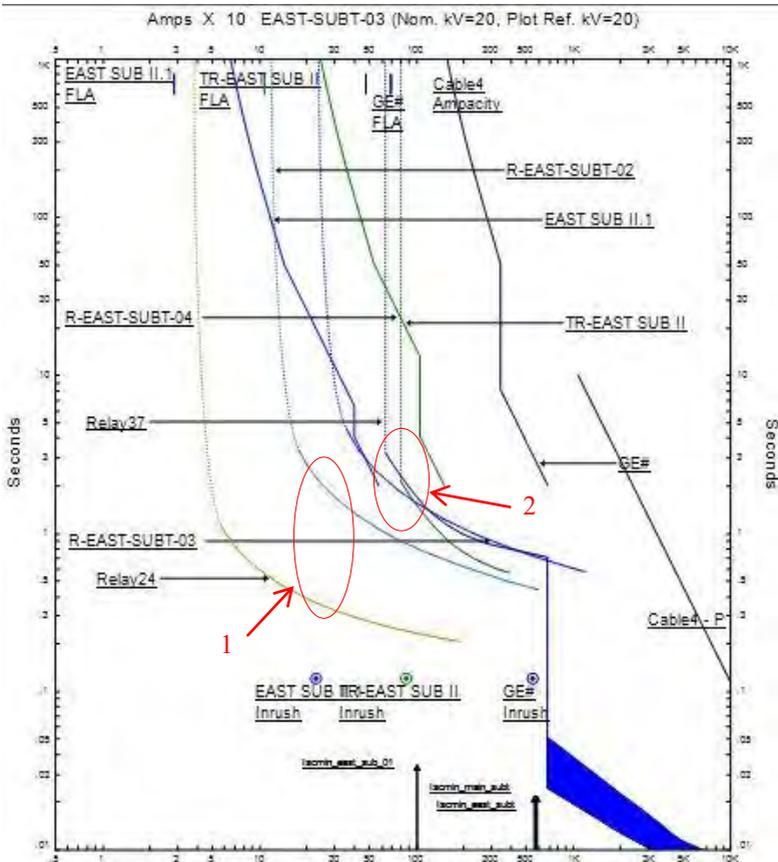
Dari hasil *resetting* yang dilakukan, dapat dilihat bahwa kurva rele 67 sudah tidak lagi memotong kurva rele R-SMBRJO-02. Selain itu *grading time* antar rele sudah berada pada *range* antara 0,2 – 0,4, dan tidak ada kurva rele yang berpotongan.

## 4.2.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 2



**Gambar 4.4** Koordinasi Rele Tipikal 2

Tipikal 2 ini merupakan koordinasi sistem pengaman dari sekunder trafo GE# dengan rating 24 MVA hingga trafo 24 dengan rating 1000 kVA. Rele – rele yang di koordinasikan antara lain rele 24, rele R-EAST-SUBT-02, rele R-EAST-SUBT-03, rele R-EAST-SUBT-04, dan rele 37. *Single Line Diagram* untuk tipikal 2 dapat dilihat pada Gambar 4.4. Sedangkan untuk data plot rele kondisi *existing* untuk tipikal 2 dapat dilihat pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 2

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 2, dapat dilihat bahwa masih ada beberapa koordinasi yang kurang tepat. Diantaranya pada lingkaran nomor 1 menunjukkan bahwa waktu *delay* yang melebihi waktu *delay* yang diperbolehkan, yaitu antara 0,2 – 0,4 detik. dan nomor 2, yaitu masih terdapat beberapa kurva rele yang berpotongan sehingga rele tidak bisa bekerja secara selektif dalam mengatasi gangguan karena saling mendahului saat bekerja.

Dengan hasil analisa koordinasi rele kondisi *existing* tipikal 2 diatas, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele pengaman. Berikut perhitungannya :

➤ **Rele 24**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : *Standart Inverse*  
*CT Ratio* : 400 / 5  
*Iscmin EAST-SUBT-01* : 8,46 KA  
*Iscmax EAST-SUBT-01* : 10,75 KA  
*FLA primer Trafo* : 240,6 A

*Time Overcurrent Pickup (Low set)*

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{n_{CT}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA}}{n_{CT}}$$

$$\frac{1,05 \times 240,6}{\frac{400}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times 240,6}{\frac{400}{5}}$$

$$3,15 \leq \text{Tap} \leq 4,21$$

Dipilih Tap = 4

$$\text{Iset} = 320 \text{ A}$$

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$

$$0,1 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{10750}{400} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,069$$

**Dipilih Td = 1**

➤ **Rele R-EAST-SUBT-02**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : *Standart Inverse*  
*CT Ratio* : 1000 / 5  
*Iscmin EAST-SUBT-01* : 8,46 KA  
*Iscmax EAST-SUBT-01* : 10,75 KA  
*FLA gabungan* : 828,75 A

*Time Overcurrent Pickup (Low set)*

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{\frac{n_{CT}}{1000}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA}}{\frac{n_{CT}}{1000}}$$

$$4,35 \leq \text{Tap} \leq 5,8$$

Dipilih Tap = 5

$$\text{Iset} = 1000 \text{ A}$$

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi = 0,3 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$

$$0,3 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{10750}{1000} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,29$$

**dipilih Td = 1,9**

➤ **Rele R-EAST-SUBT-03**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : *Standart Inverse*  
*CT Ratio* : 200 / 5  
*Iscmin EAST-SUBT-03* : 5,7 KA  
*Iscmax EAST-SUBT-03* : 7 KA  
*Iscmax EAST-SUBT-01* : 10,75 KA

FLA TR-EAST SUB II Primer : 108,3 A

Time Overcurrent Pickup (Low set)

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{\frac{n_{\text{CT}}}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA}}{\frac{n_{\text{CT}}}{5}}$$

$$\frac{1,05 \times 108,3}{\frac{200}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times 108,3}{\frac{200}{5}}$$

$$2,82 \leq \text{Tap} \leq 3,79$$

Dipilih Tap = 3

$$\text{Iset} = 120 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{\text{scmax}}}{I_{\text{pickup}}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$

$$0,1 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{7000}{200} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,063$$

dipilih  $T_d = 3,4$

➤ **Rele R-EAST-SUBT-04**

*Manufacturer* : GE Multilin

*Model* : IJCV

*Curve Type* : *Standart Inverse (0%)*

*CT Ratio* : 600 / 5

Iscmin MAIN SUBT-BUS: 5,9 kA

Iscmax MAIN SUBT-BUS: 7,21 kA

FLA Gabungan : 411,4 A

Time Overcurrent Pickup (Low set)

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{\frac{n_{\text{CT}}}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA}}{\frac{n_{\text{CT}}}{5}}$$

$$\frac{1,05 \times 411,4}{\frac{600}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times 411,4}{\frac{600}{5}}$$

$$3,6 \leq \text{Tap} \leq 4,8$$

Dipilih Tap = 4

$$\text{Iset} = 480 \text{ A}$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,3 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$
$$0,3 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{7210}{600} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,27$$

**dipilih  $T_d = 5,7$**

### Instantaneous Pickup : Disable / Lock

#### ➤ Rele 37

<i>Manufacturer</i>	: GE Multilin
<i>Model</i>	: IJCV
<i>Curve Type</i>	: <i>Standart Inverse</i> (0%)
<i>CT Rati</i>	: 800 / 5
Iscmin MAIN SUBT-BUS	: 5,9 kA
Iscmax MAIN SUBT-BUS	: 7,21 kA
FLA Gabungan	: 692,8 A

### Time Overcurrent Pickup (Low set)

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

$$\frac{1,05 \times \text{FLA Trafo}}{n_{CT}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA Trafo}}{n_{CT}}$$

$$\frac{1,05 \times 692,8}{\frac{800}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times 692,8}{\frac{800}{5}}$$

$$4,55 \leq \text{Tap} \leq 6,062$$

Dipilih Tap = 5

$$I_{set} = 800 \text{ A}$$

### Time Dial

Dipilih waktu operasi = 0,5 s

$$t = \frac{K \times T_d}{\beta \times \left[ \left( \frac{I}{I_{EB}} \right)^\alpha - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[ \left( \frac{I}{IEB} \right)^\alpha - 1 \right]}{K}$$

$$T_d = \frac{t \times \beta \times \left[ \left( \frac{I_{sc} \text{ max main subt-bus}}{\text{tap} \times nCT} \right)^{0.02} - 1 \right]}{0.14}$$

$$T_d = \frac{0.5 \times 2.97 \times \left[ \left( \frac{7210}{5 \times \frac{800}{5}} \right)^{0.02} - 1 \right]}{0.14}$$

$$T_d = 0,524$$

**dipilih Td = 3,62**

### Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA < I_{sc} < 0,8 \times I_{scmin}$$

$$1,6 \times 692.8 < I_{sc} < 0,8 \times 5900$$

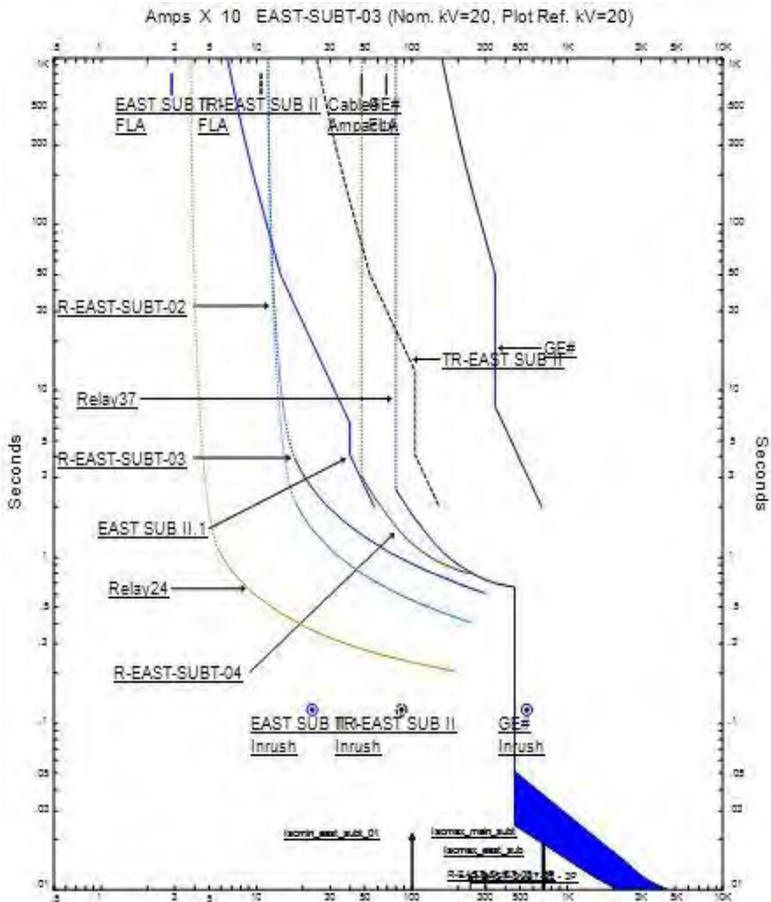
$$1108,48 < I_{sc} < 4720$$

$$\frac{1108.48}{800/5} < \text{Tap} < \frac{4720}{800/5}$$

$$6,92 < \text{Tap} < 29,5$$

**Dipilih Tap = 29**

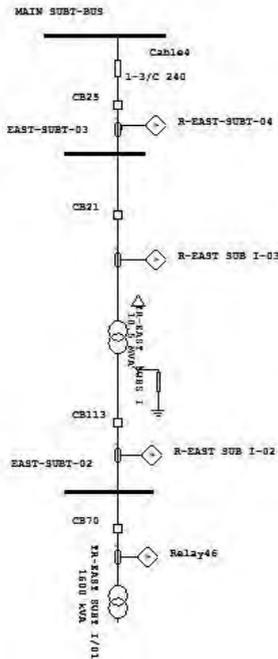
Dengan menggunakan hasil perhitungan tersebut, maka dapat di plot kurva arus waktu untuk kondisi setelah *resetting* menggunakan perangkat lunak ETAP. Dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.6** Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 2

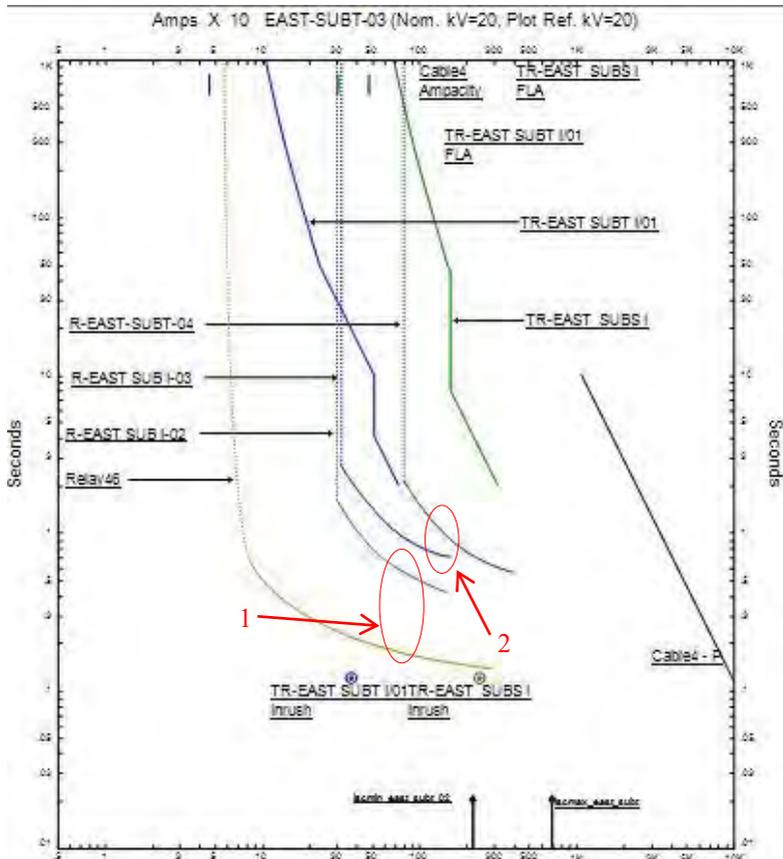
Dari hasil *resetting* yang dilakukan pada tipikal 2, dapat dilihat bahwa kurva rele R-EAST-SUBT-03, rele R-EAST-SUBT-04, dan rele 37 sudah tidak lagi saling memotong. Selain itu *grading time* antar rele sudah berada pada *range* antara 0,2 – 0,4, dan tidak ada kurva rele yang berpotongan.

### 4.2.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3



**Gambar 4.7** Koordinasi Rele Tipikal 3

Tipikal 3 ini merupakan koordinasi sistem pengaman dari Main Subt bus tegangan 20 kV sampai dengan trafo TR east subt I/01 dengan rating 1600 kVA. Rele – rele yang di koordinasikan antara lain rele46, rele R-EAST SUB I-02, rele R-EAST SUB I-03, dan rele R-EAST-SUBT-04. *Single Line Diagram* untuk tipikal 3 dapat dilihat pada Gambar 4.7. Sedangkan data plot rele kondisi *existing* untuk tipikal 3 dapat dilihat pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.8** Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 3

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 3, dapat dilihat bahwa masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat walaupun tidak ada kurva yang saling memotong. Diantaranya pada lingkaran yang ditunjukkan oleh nomor 1, dan nomor 2 menunjukkan bahwa waktu *setting grading time* antara relay46 dengan rele R-EAST SUB I-02 tidak memenuhi syarat yang diperbolehkan dan begitu dengan rele R-EAST SUB I-03 dengan rele R-EAST SUB I-04 yang tidak memenuhi *grading time* yaitu antara 0,2 – 0,4 detik. Dengan hasil analisa koordinasi rele

kondisi *existing* tipikal 3 diatas, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele pengaman. Berikut perhitungannya :

➤ **Rele 46**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IJCV  
*Curve Type* : *Standart Inverse* (0%)  
*CT Ratio* : 600 / 5  
 Iscmin EAST-SUBT-02 : 18,32 KA  
 Iscmax EAST-SUBT-02 : 28,1 KA  
 FLA Primer Tr East Subt 1/01 : 384,9 A

*Time Overcurrent Pickup (Low set)*

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{\frac{n_{CT}}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA}}{\frac{n_{CT}}{5}}$$

$$\frac{1,05 \times 384,9}{\frac{600}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times 384,9}{\frac{600}{5}}$$

$$3,36 \leq \text{Tap} \leq 4,5$$

Dipilih Tap = 4  
Iset = 480 A

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$

$$0,1 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{28100}{600} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,058$$

**dipilih Td = 0,5**

*Instantaneous Pickup*

$$1,6 \times \text{FLA} < I_{set} < 0,8 \times \text{Iscmin}$$

$$1,6 \times 384,9 < I_{set} < 0,8 \times 18320$$

$$615,84 < I_{set} < 14656$$

$$\frac{615,84}{\frac{600}{5}} < \text{Tap} < \frac{14656}{\frac{600}{5}}$$

$$5,13 < \text{Tap} < 122,1$$

**Dipilih Tap = 30**

➤ **Rele R-EAST-SUBT-I-02**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IJCV  
*Curve Type* : Standart Inverse (0%)  
*CT Ratio* : 2500 / 5  
 Iscmin EAST-SUBT-02 : 18,32 KA  
 Iscmax EAST-SUBT-02 : 28,1 KA  
 FLA gabungan : 2292,9 A

Time Overcurrent Pickup (Low set)

$$105 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1.05 \times \text{FLA}}{\frac{n_{CT}}{2500}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1.4 \times \text{FLA}}{\frac{n_{CT}}{2500}}$$

$$\frac{1.05 \times 2292,9}{\frac{5}{5}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1.4 \times 2292,9}{\frac{5}{5}}$$

$$4,81 \leq \text{Tap} \leq 6,42$$

Dipilih Tap = 5

$$\text{Iset} = 2500 \text{ A}$$

Dipilih waktu operasi = 0,3 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^{\alpha} - 1 \right]} \right\}$$

$$0,3 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{28100}{2500} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,285$$

dipilih  $T_d = 1,8$

Instantaneous Pickup : Disable / Lock

➤ **Rele R-EAST-SUBT-I-03**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IJCV  
*Curve Type* : Standart Inverse (0%)  
*CT Ratio* : 400 / 5  
 Iscmin EAST-SUBT-03 : 5,7 KA  
 Iscmax EAST-SUBT-03 : 7 KA

Iscmax EAST-SUBT-02 : 28,1 KA  
 FLA TR-EAST SUB I Primer : 303,1 A

Time Overcurrent Pickup (Low set)

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

$$\frac{1,05 \times FLA}{\frac{n_{CT}}{400}} \leq Tap \leq \frac{1,4 \times FLA}{\frac{n_{CT}}{400}}$$

$$\frac{1,05 \times 303,1}{\frac{400}{5}} \leq Tap \leq \frac{1,4 \times 303,1}{\frac{400}{5}}$$

$$3,97 \leq Tap \leq 5,3$$

Dipilih Tap = 4

$$I_{set} = 320 \text{ A}$$

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

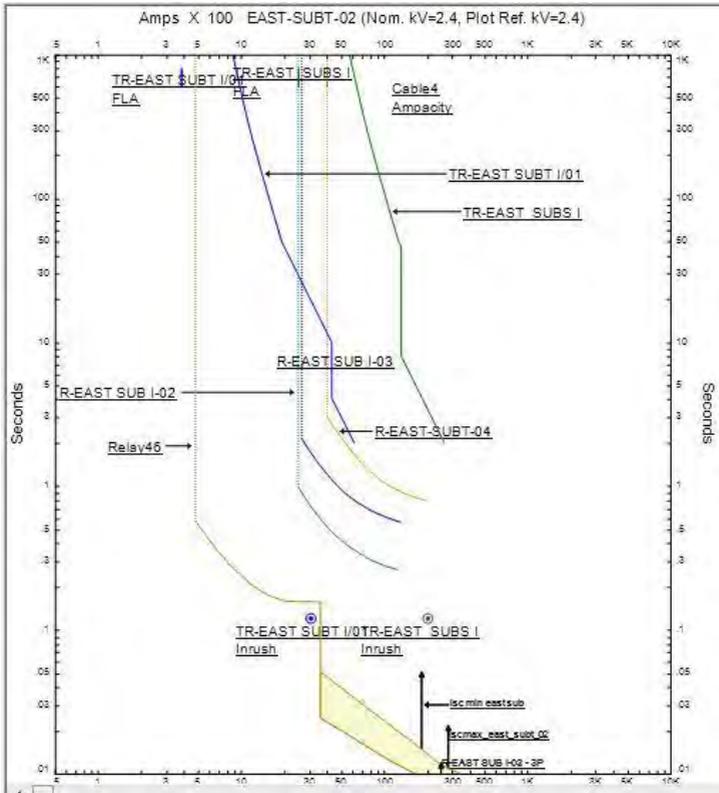
$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^a - 1 \right]} \right\}$$

$$0,1 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{7000}{400} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,08$$

**dipilih Td = 4**

**Instantaneous Pickup : Disable / Lock**

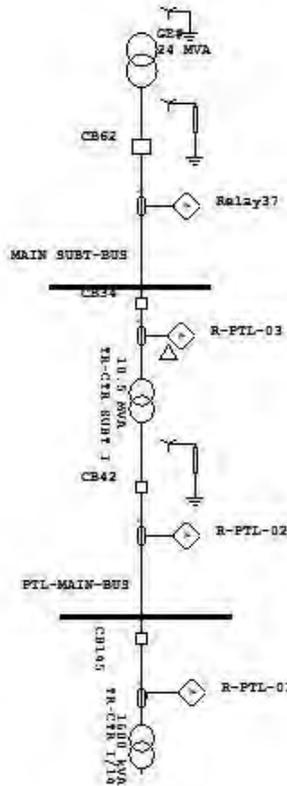


**Gambar 4.9** Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 3

Dengan menggunakan hasil perhitungan tersebut, maka dapat di plot kurva arus waktu untuk kondisi setelah *resetting* menggunakan perangkat lunak ETAP. Dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.9.

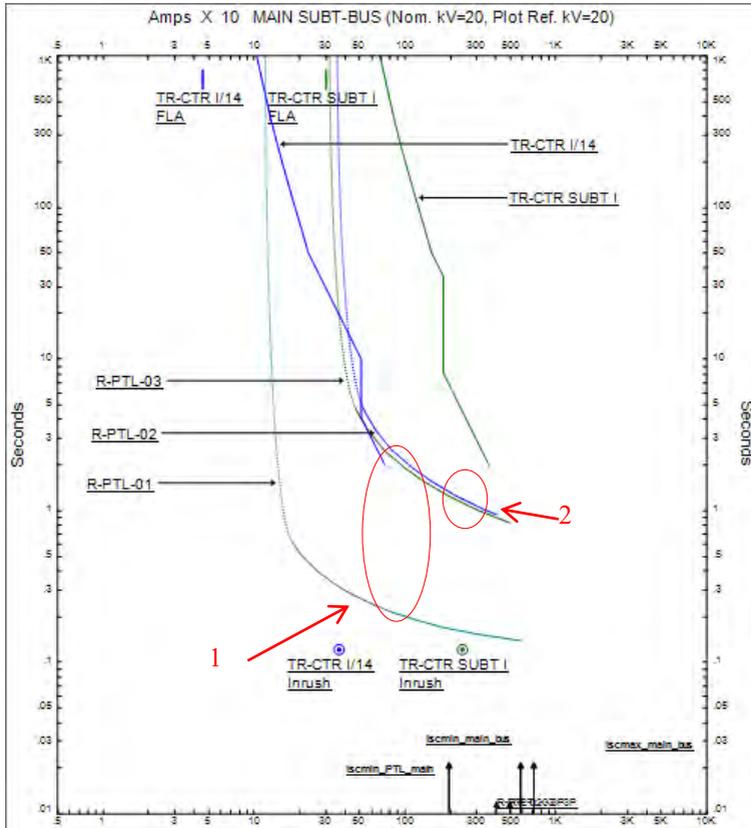
Dari hasil *resetting* yang dilakukan, dapat dilihat bahwa kurva rele antara rele 46, R-EAST SUB I-02, rele R-EAST SUB I-03, rele R-EAST-SUBT-04 sudah memenuhi *setting grading time* antar rele yang berada pada *range* antara 0,2 – 0,4 detik.

#### 4.2.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 4



**Gambar 4.10** Koordinasi Rele Tipikal 4

Tipikal 4 ini merupakan koordinasi sistem pengaman dari bus Main-subt-bus hingga trafo TR-CTR I/14 dengan tegangan 1600 kVA. Rele – rele yang di koordinasikan antara lain rele R-PTL-01, rele R-PTL-02, dan rele R-PTL-03. *Single Line Diagram* untuk tipikal 4 dapat dilihat pada Gambar 4.10. Sedangkan untuk data plot rele kondisi *existing* untuk tipikal 4 dapat dilihat pada Gambar 4.11.



**Gambar 4.11** Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 4

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 4, dapat dilihat bahwa masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat. Diantaranya pada lingkaran yang ditunjukkan oleh nomor 1, bahwa kurva dari waktu *delay* rele R-PTL-01 dengan rele R-PTL-02 yang kurang dari waktu *delay* yang diperbolehkan, yaitu antara 0,2 – 0,4 detik. Begitu pula dengan lingkaran pada nomor 2 menunjukkan bahwa rele R-PTL-02 dengan rele R-PTL-03 memiliki waktu *delay* yang kurang juga dari waktu *delay* yang diperbolehkan, yaitu antara 0,2 – 0,4 detik.

Dengan hasil analisa koordinasi rele kondisi *existing* tipikal 4 diatas, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele pengaman. Berikut perhitungannya :

➤ **Rele R-PTL-01**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : *Standart Inverse*  
*CT Ratio* : 500 / 5  
 Iscmin PTL-MAIN-BUS : 16,48 KA  
 Iscmax PTL-MAIN-BUS : 18,63 KA  
 FLA TR-CTR I/14 Primer : 384,9 A

*Time Overcurrent Pickup (Low set)*

$$1.05 \times FLA \leq Iset \leq 1.4 \times FLA$$

$$\frac{1.05 \times FLA}{\frac{n_{CT}}{5}} \leq Tap \leq \frac{1.4 \times FLA}{\frac{n_{CT}}{5}}$$

$$4.04 \leq Tap \leq 5.39$$

Dipilih Tap = 5

$$Iset = 500 \text{ A}$$

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = Td \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$

$$0,1 = Td \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{18630}{500} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$Td = 0,06$$

**dipilih Td = 0,5**

➤ **Rele R-PTL-02**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : *Standart Inverse*  
*CT Ratio* : 3000 / 5

Iscmin PTL-MAIN-BUS : 16,48 KA  
 Iscmax PTL-MAIN-BUS : 18,63 KA  
 FLA Gabungan : 2477,8 A

Time Overcurrent Pickup (Low set)

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

$$\frac{1,05 \times FLA}{\frac{nCT}{5}} \leq Tap \leq \frac{1,4 \times FLA}{\frac{nCT}{5}}$$

$$\frac{1,05 \times 2477,8}{\frac{3000}{5}} \leq Tap \leq \frac{1,4 \times 2477,8}{\frac{3000}{5}}$$

$$3,97 \leq Tap \leq 5,3$$

Dipilih Tap = 5

$$I_{set} = 3000 \text{ A}$$

Dipilih waktu operasi = 0,3 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^\alpha - 1 \right]} \right\}$$

$$0,3 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{18630}{3000} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,38$$

**dipilih Td = 1**

➤ **Rele R-PTL-03**

*Manufacturer* : GE Multilin  
*Model* : IAC-51A  
*Curve Type* : *Standart Inverse*  
*CT Ratio* : 400 / 5  
 Iscmin MAIN SUBT-BUS: 5,9 kA  
 Iscmax MAIN SUBT-BUS: 7,21 kA  
 Iscmax PTL-MAIN-BUS : 18,63 KA  
 FLA TR-CTR SUBT I Primer : 303,1

*Time Overcurrent Pickup (Low set)*

$$1,05 \times \text{FLA} \leq \text{Iset} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$\frac{1,05 \times \text{FLA}}{\frac{n_{CT}}{500}} \leq \text{Tap} \leq \frac{1,4 \times \text{FLA}}{\frac{n_{CT}}{500}}$$

$$3,97 \leq \text{Tap} \leq 5,3$$

Dipilih Tap = 5

$$\text{Iset} = 500 \text{ A}$$

Dipilih waktu operasi = 0,1 s

$$t = T_d \times \left\{ \frac{K}{\beta \left[ \left( \frac{I_{scmax}}{I_{pickup}} \right)^a - 1 \right]} \right\}$$

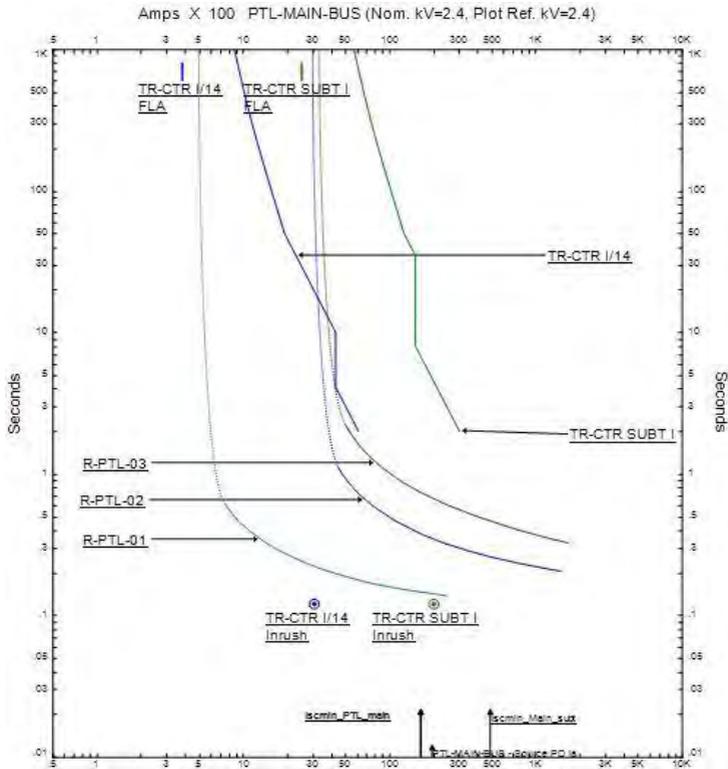
$$0,1 = T_d \times \left\{ \frac{0,14}{2,97 \left[ \left( \frac{7210}{500} \right)^{0,02} - 1 \right]} \right\}$$

$$T_d = 0,086$$

**dipilih  $T_d = 2$**

Dengan menggunakan hasil perhitungan tersebut, maka dapat di plot kurva arus waktu untuk kondisi tipikal 4 setelah *resetting* menggunakan perangkat lunak ETAP. Dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.12.

Dari hasil *resetting* yang dilakukan, dapat dilihat bahwa rele R-PTL-01, rele R-PTL-02, dan rele R-PTL-03 sudah memenuhi *setting grading time* antar rele yang berada dalam *range* antara 0,2 – 0,4.



**Gambar 4.12** Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 4

### 4.3 Hasil Simulasi Energi Busur Api Menggunakan Perangkat Lunak ETAP (*Resetting*)

Pada sub bab ini akan ditampilkan data hasil simulasi insiden energi busur api setelah dilakukan *resetting* koordinasi proteksi. *Resetting* dilakukan sebagai pertimbangan ketika terjadi gangguan yang menyebabkan terjadinya busur api, maka rele proteksi dapat bekerja secara selektif mengamankan lokasi gangguan. Berikut data hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Setelah *Resetting* di PT. Semen Indonesia, Gresik

Bus ID	Arus Bolted Fault (kA)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori
MAIN SUBT-BUS	8,92	8,63	0.121	13,22	Kategori 3
SMBRJO-02-BUS	8,63	8,92	0.122	12,90	Kategori 3
EAST-SUBT-03	8,66	8,66	0.122	12,95	Kategori 3
EAST-SUBT-02	12,08	33,63	0.272	14,79	Kategori 3
PTL-MAIN-BUS	23,58	22,55	0.449	15,87	Kategori 3

Berdasarkan tabel 4.2, jika dibandingkan dengan kondisi *existing*, kondisi *resetting* banyak mengalami penurunan insiden energi. Hal ini dikarenakan sistem kelistrikan yang telah terkoordinasi secara baik dan tepat, dan juga dikarenakan suplai yang hanya dari PLN membuat penurunan yang cukup baik. Dengan adanya *resetting* waktu kerja rele yang berkurang membuat FCT berkurang. Berkurangnya FCT sendiri membuat energi menurun.

#### 4.3.1 Perhitungan Energi Busur Api (*Resetting*) dengan Standar IEEE 1584-2002

Sebelum menghitung besarnya insiden energi busur api, terlebih dahulu untuk mendapatkan nilai dari arus *arc fault* sesuai dengan persamaan 2.4. Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi :

$$I_a = 1,00929 \times I_{bf}^{0,983} \quad (4.1)$$

Untuk besarnya insiden energi normalisasi pada sistem tegangan menengah 2,4 kV dengan konfigurasi didalam *box* ( $K_1 = -0,555$ ), sistem yang termasuk *high resistance* ( $K_2 = 0$ ), dan jarak antar konduktor ( $G$ ) untuk tegangan tersebut tipikalnya 102 mm, maka besar insiden energi normalisasi adalah :

$$E_n = 0,364 \times I_a^{1,081} \quad (\text{cal/cm}^2) \quad (4.2)$$

Maka persamaan insiden energi yang sebenarnya pada tegangan < 15 kV adalah :

$$E = C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \quad (4.3)$$

Dan untuk persamaan insiden energi pada tegangan > 15 kV adalah:

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V Ibf} \left( \frac{t}{D^2} \right) \quad (4.4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 4.1 ke persamaan 4.2, kemudian persamaan ke 4.2 ke persamaan 4.3 dengan nilai  $C_f = 1$ , maka persamaan besar insiden energi pada < 15 kV untuk sistem kelistrikan di Semen Indonesia (*plant* Gresik) dapat disederhanakan menjadi :

$$E = 1,233 \times I_{bf}^{1,0626} \times t \quad (\text{cal/cm}^2) \quad (4.5)$$

Dan untuk insiden energi pada > 15 kV adalah :

$$E = 12,41 \times I_{bf} \times t \quad (\text{cal/cm}^2) \quad (4.6)$$

Perhitungan Insiden Energi pada tiap bus :

**Bus East Subt 02 2.4 KV**

$$I_{bf} = 35,4 \text{ kA}; t = 0,272 \text{ detik}$$

$$E = 1,233 \times I_{bf}^{1,0626} \times t$$

$$E = 1,233 \times 35,4^{1,0626} \times 0,272 = \mathbf{14,84 \text{ cal/cm}^2}$$

**Bus PTL Main Bus 2,4 KV**

$$I_{bf} = 23,58 \text{ kA}; t = 0,449 \text{ detik}$$

$$E = 1,233 \times I_{bf}^{1,0626} \times t$$

$$E = 1,233 \times 23,58^{1,0626} \times 0,449 = \mathbf{15,91 \text{ cal/cm}^2}$$

**Bus Main Subt Bus 20 KV**

$$I_{bf} = 8,92 \text{ kA}; t = 0,121 \text{ detik}$$

$$E = 12,41 \times I_{bf} \times t$$

$$E = 12,41 \times 8,92 \times 0,121 = \mathbf{13,4 \text{ cal/cm}^2}$$

**Bus East Subt 03 20 KV**

$$I_{bf} = 7,85 \text{ kA}; t = 0,122 \text{ detik}$$

$$E = 12,41 \times t \times I_{bf}$$

$$E = 12,41 \times 0,122 \times 7,85 = \mathbf{11,89 \text{ cal/cm}^2}$$

### **Bus SMBRJO 02 20 KV**

$$I_{bf} = 8,63 \text{ kA}; t = 0,372 \text{ detik}$$

$$E = 12,41 \times t \times I_{bf}$$

$$E = 12,41 \times 0,372 \times 8,63 = \mathbf{39,84 \text{ cal/cm}^2}$$

Semakin besarnya insiden energi dikarenakan FCT (*Fault Clearing Time*) semakin besar.

Dari hasil perhitungan didapatkan hasil yang hampir sama dengan hasil simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa besaran energi yang didapat telah sesuai.

### **4.3.2 Perhitungan Energi Busur Api (*Resetting*) dengan Metode Modifikasi Perhitungan**

Pada metode modifikasi perhitungan insiden energi busur api, terdapat beberapa pertimbangan, antara lain berkurangnya besar kontribusi arus hubung singkat berdasarkan periode gelombang arus hubung singkat, dan waktu pemutusan masing – masing *circuit breaker* yang menuju titik gangguan. Dalam perhitungannya akan dikelompokkan kedalam beberapa domain waktu seperti yang telah ditunjukkan dalam Tabel 2.3. Berikut perhitungan insiden energi pada tiap bus dengan metode modifikasi perhitungan :

#### **Bus Main Subt 20 Kv (FCT = 0,121)**

- Domain waktu 0 – 0,035 detik
 
$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,41 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Main Subt Bus}) \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 12,41 \times (0,156 + 6,81 + 1,54 + 0,052 + 0,378) \times 0,035$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 3,88 \text{ cal/cm}^2$$
- Domain waktu 0,035 – 0,121 detik
 
$$E_{0,121 \text{ detik}} = 12,41 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Main Subt Bus}) \times \Delta t$$

$$E_{0,121 \text{ detik}} = 12,41 \times (6,81 + 0,067 + 1,03 + 0,022 + 0,166) \times 0,086$$

$$E_{0,121 \text{ detik}} = 8,6394 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus Main Subt :**

$$\mathbf{3,88 + 8,6394 = 12,5194 \text{ cal/cm}^2}$$

### **Bus SMBRJO 02 20 kV (FCT = 0,122)**

- Domain waktu 0 – 0,035 detik  
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 12,41 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus SMBRJO 02}) \times \Delta t$   
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 12,41 \times (0,059 + 0,001 + 0,096 + 8,48) \times 0,035$   
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 3,75 \text{ cal/cm}^2$
- Domain waktu 0,035 – 0,122 detik  
 $E_{0,372 \text{ detik}} = 12,41 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus SMBRJO 02}) \times \Delta t$   
 $E_{0,372 \text{ detik}} = 12,41 \times (0,025 + 0,001 + 0,042 + 7,78) \times 0,087$   
 $E_{0,372 \text{ detik}} = 9,31 \text{ cal/cm}^2$

**Total Insiden Energi Bus Main Subt :**  
**3,75 + 9,31 = 13,06 cal/cm<sup>2</sup>**

### **Bus East Subt 03 20 kV (FCT = 0,122)**

- Domain waktu 0 – 0,035 detik  
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 12,41 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ East Subt Bus 03}) \times \Delta t$   
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 12,41 \times (0,353 + 7,11 + 1,2) \times 0,035$   
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 3,76 \text{ cal/cm}^2$
- Domain waktu 0,035 – 0,122 detik  
 $E_{0,122 \text{ detik}} = 12,41 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ East Subt Bus 03}) \times \Delta t$   
 $E_{0,122 \text{ detik}} = 12,41 \times (0,163 + 6,81 + 0,877) \times 0,086$   
 $E_{0,122 \text{ detik}} = 8,48 \text{ cal/cm}^2$

**Total Insiden Energi Bus East Subt 03 :**  
**3,76 + 8,48 = 12,24 cal/cm<sup>2</sup>**

### **Bus East Subt 02 2,4 kV (FCT = 0,272 detik)**

- Domain waktu 0 – 0,035 detik  
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 1,233 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus East Subt 02})^{1,0626} \times \Delta t$   
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 1,233 \times (22,2 + 4,31 + 4,31 + 4,31 + 0,302)^{1,0626} \times 0,035$   
 $E_{0,035 \text{ detik}} = 1,91 \text{ cal/cm}^2$
- Domain waktu 0,035 – 0,272 detik

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 1,233 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus East Subt 02})^{1,0626} \times \Delta t$$

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 1,233 \times (21,64 + 2,87 + 2,87 + 0,133)^{1,0626} \cdot 0,237$$

$$E_{0,272 \text{ detik}} = 10,98 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus Bus East Subt 02 :**  
**1,91 + 10,98 = 12,89 cal/cm<sup>2</sup>**

#### **Bus PTL Main Bus 2,4 kV (FCT = 0,449 detik)**

- Domain waktu 0 – 0,035 detik  

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 1,233 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus East Subt 02})^{1,0626} \times \Delta t$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 1,233 \times (0,025 + 0,54 + 0,178 + 0,008 + 0,39 + 20,58 + 0,067 + 0,331 + 0,331 + 0,56 + 0,054 + 0,133 + 0,359 + 0,236 + 0,225 + 0,464 + 0,221)^{1,0626} \times 0,035$$

$$E_{0,035 \text{ detik}} = 1,24 \text{ cal/cm}^2$$
- Domain waktu 0,035 – 0,272 detik  

$$E_{0,449 \text{ detik}} = 1,233 \times (\text{Total kontribusi } I_{bf} \text{ Bus East Subt 02})^{1,0626} \times \Delta t$$

$$E_{0,449 \text{ detik}} = 1,233 \times (0,001 + 0,022 + 0,073 + 0,003 + 20,07 + 0,162 + 0,028 + 0,138 + 0,138 + 0,023 + 0,022 + 0,05 + 0,152 + 0,098 + 0,093 + 0,194 + 0,092)^{1,0626} \cdot 0,418$$

$$E_{0,449 \text{ detik}} = 13,31 \text{ cal/cm}^2$$

**Total Insiden Energi Bus Bus East Subt 02 :**  
**1,24 + 13,31 = 14,54 cal/cm<sup>2</sup>**

#### **4.4 Perhitungan *Flash Protection Boundary* (FPB)**

Setelah data – data dari hasil energi busur api diperoleh, maka data yang perlu diketahui juga adalah *Flash Protection Boundary* (FPB) yang mana data ini merepresentasikan jarak aman pekerja dari titik yang berpotensi terjadinya busur api. Jarak aman pekerja ini adalah jarak aman dimana pekerja berada pada titik sejauh sekian meter dimana jika terjadi busur api, pekerja tersebut tetap aman walau tanpa mengenakan PPE.

Besarnya *Flash Protection Boundary* (FPB) didapat dengan memasukan parameter *incident energy* yang telah didapat dengan metode yang dimodifikasi. Berikut penjelasannya:

Pada bus bertegangan  $> 15$  kV :

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V Ibf} \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (4.7)$$

Pada bus bertegangan  $< 15$  kV :

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (4.8)$$

Adapun penyederhanaan rumusnya untuk kategori tegangan 1 – 15 kV yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$D_B = \left[4,184 \cdot \frac{E}{E_B} \cdot D^x\right]^{\frac{1}{x}} \quad (4.9)$$

Dengan :

E = Insiden Energi ( $\text{cal/cm}^2$ )

$E_B$  = adalah insiden energi dalam  $\text{J/cm}^2$  pada jarak batasan. Dapat di set pada nilai  $5,0 \text{ J/cm}^2$

D = adalah jarak dari titik *arc* ke pekerja (mm). Untuk sistem 2,4 kV, digunakan 910 mm.

x = eksponen jarak. Untuk sistem 2,4 kV, digunakan 0,973.

Dan untuk rumus pada tegangan  $> 15$  kV adalah sebagai berikut :

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times \text{Ibf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)} \quad (4.10)$$

Dengan :

E = Insiden Energi ( $\text{cal/cm}^2$ )

$E_B$  = adalah insiden energi dalam  $\text{J/cm}^2$  pada jarak batasan. Dapat di set pada nilai  $5.0 \text{ (J/cm}^2\text{)}$

t = adalah waktu FCT (s)

#### 4.4.1 Hasil Simulasi *Flash Protection Boundary* Menggunakan *Software ETAP (Existing)*

Setelah data data dari energi busur api didapat baik simulasi maupun perhitungan, maka data data yang perlu diketahui juga yang berhubungan erat dengan energi busur api adalah besarnya *flash protection boundary* yang mana merepresentasikan jarak aman pekerja dari sumber *arcing* yang dapat mengakibatkan luka bakar tingkat dua. Berikut tabel yang menunjukkan besarnya *flash protection boundary* kondisi *existing* :

**Tabel 4.3** Data *Existing* Besarnya Flash Protection Boundary Hasil Simulasi ETAP

Bus ID	Arus Bolted Fault (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	DB (m)
MAIN SUBT-BUS	8,92	0,917	100,22	8,37
SMBRJO-02-BUS	8,63	0,372	39,35	5,25
EAST-SUBT-03	8,66	0,571	60,62	5,25
EAST-SUBT-02	35,4	0,430	49,26	41,59
PTL-MAIN-BUS	23,58	1,069	79,56	68,06

#### 4.4.2 Hasil Simulasi *Flash Protection Boundary* Menggunakan *Software ETAP (resetting)*

Setelah mendapatkan besarnya *flash protection boundary* dalam kondisi eksisting, dalam sub bab ini akan ditampilkan hasil simulasi besarnya *flash protection boundary* dalam kondisi *resetting*. Berikut hasil dari *flash protection boundary* yang didapat :

**Tabel 4.4** Data *Resetting* Besarnya Flash Protection Boundary Hasil Simulasi ETAP

Bus ID	Arus Bolted Fault (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	DB (m)
MAIN SUBT-BUS	8,92	0.121	13,22	3,04
SMBRJO-02-BUS	8,63	0.122	12,90	3
EAST-SUBT-03	8,66	0.122	12,95	3
EAST-SUBT-02	35,4	0.272	14,79	12,08
PTL-MAIN-BUS	23,58	0.449	15,87	12,99

#### 4.4.3 Perhitungan FPB Berdasarkan Hasil Insiden Energi Setelah *Resetting*

Pada sub-bab ini akan dibahas perhitungan *flash protection boundary* dari hasil besar insiden energi setelah dilakukan *resetting*. Perhitungan dilakukan pada tiap – tiap bus dengan tertentu untuk mengetahui jarak aman pekerja disekitar bus tersebut.

##### MAIN SUBT-BUS

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 8,92 \times \left(\frac{0,121}{5}\right)}$$

$$= 3040,9 \text{ mm} = 3,04 \text{ m}$$

##### SMBRJO-02-BUS

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 8,63 \times \left(\frac{0,122}{5}\right)}$$

$$= 3003,4 \text{ mm} = 3,003 \text{ m}$$

##### EAST-SUBT-03

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 8,66 \times \left(\frac{0,121}{5}\right)}$$

$$= 3008,7 \text{ mm} = 3,008 \text{ m}$$

### PTL-MAIN-BUS

$$D_B = \left[ 4,184 \cdot \frac{15,87}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$
$$= 12984 \text{ mm} = 12,98 \text{ m}$$

### EAST-SUBT-02

$$D_B = \left[ 4,184 \cdot \frac{14,79}{5} \cdot 910^{0,973} \right]^{\frac{1}{0,973}}$$
$$= 12076 \text{ mm} = 12,076 \text{ m}$$

Hasil perhitungan jarak aman pekerja yang diperoleh nilai tidak terlalu jauh, hal ini dikarenakan insiden energinya pun kecil dan pada kategori 3. Pada sub-bab berikutnya akan dibahas perbandingan besar energy busur api *existing*, *resetting* dan metode modifikasi.

#### 4.5 Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi *Existing* dan Setelah *Resetting* (Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Metode Modifikasi Perhitungan)

Setelah pada beberapa sub-bab sebelumnya ditampilkan hasil simulasi serta perhitungan besar insiden energi busur api pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia (*Plant* Gresik), kali ini akan dijelaskan mengenai perbedaan tersebut. Perbandingan data – data insiden energi ditampilkan dalam tabel 4.5 dan tabel 4.6.

**Tabel 4.5** Data Perbandingan Besar Insiden Energi Untuk Kondisi *Existing* dan *Resetting*

Bus ID	Insiden Energi <i>Existing</i> (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Insiden Energi <i>Resetting</i> (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori
MAIN SUBT-BUS	100,22	> Kategori 4	13,22	Kategori 3
SMBRJO-02-BUS	39,35	Kategori 4	12,90	Kategori 3
EAST-SUBT-03	60,62	> Kategori 4	12,95	Kategori 3
EAST-SUBT-02	49,26	> Kategori 4	14,79	Kategori 3
PTL-MAIN-BUS	79,56	> Kategori 4	15,87	Kategori 3

**Tabel 4.6** Data Perbandingan Besar Insiden Energi Untuk Kondisi *Resetting* dan *Modified*

Bus ID	Insiden Energi <i>Resetting</i> (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Insiden Energi <i>Resetting Modified</i> (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori
MAIN SUBT-BUS	13,22	Kategori 3	13,4	Kategori 3
SMBRJO-02-BUS	12,90	Kategori 3	12,90	Kategori 3
EAST-SUBT-03	12,95	Kategori 3	11,89	Kategori 3
EAST-SUBT-02	14,79	Kategori 3	14,84	Kategori 3
PTL-MAIN-BUS	15,87	Kategori 3	15,91	Kategori 3

Dari tabel 4.5 yang sudah ditampilkan, besar insiden energi berkurang ketika dilakukan *resetting* koordinasi proteksi. Hal ini dikarenakan ketika dalam kondisi *existing*, setting rele waktu kerja rele yang satu dengan rele yang lain masih belum terkoordinasi dengan baik, banyak waktu kerja rele yang tidak sesuai, terlalu cepat atau bekerja bersamaan dengan rele yang lain dalam waktu yang sama lambat. Setelah dilakukan koordinasi rele proteksi yang sesuai dan dapat bekerja secara selektif, maka waktu kerjanya akan berurutan dari sisi beban menuju sumber, yang mana dimulai dari waktu kerja rele yang cepat sampai waktu yang lebih lama sebagai *backup*-nya. Dengan adanya settingan waktu rele yang semakin baik tersebut dalam melokalisir gangguan, maka insiden energi akan semakin berkurang karena waktu FCT yang berkurang.

Pada tabel 4.6 ditampilkan data besar insiden energi setelah *resetting* untuk perhitungan dengan standard IEEE 1584-2002 dibandingkan dengan perhitungan dengan metode modifikasi. Tabel tersebut menunjukkan bahwa insiden energi dengan metode modifikasi perhitungan dengan standard IEEE 1584-2002 kurang lebih sama. Hal ini dikarenakan sumber dari industri ini hanya dari PLN yang membuat domain waktu sedikit dan juga dipertimbangkan berkurangnya arus kontribusi hubung singkat menurut periode waktu hubung singkat. Sedangkan dalam perhitungan standard IEEE, tidak dipertimbangkan hal – hal seperti itu, demikian juga dalam penentuan waktu pemutusan CB

sebagai nilai FCT, yaitu dipilih waktu pemutusan yang terlama. Dengan penjelasan seperti diatas, metode modifikasi lebih akurat dalam menentukan besarnya insiden energi yang ada.

#### 4.6 Perbandingan Nilai *Flash Protection Boundary* (FPB) Kondisi *Existing* dan *Resetting*)

*Flash Protection Boundary* merupakan jarak aman pekerja dari titik terjadinya busur api, atau jarak dari titik busur api yang dapat menghasilkan energi 1,2 cal/cm<sup>2</sup>. Dalam jarak batasan ini, seseorang masih diperbolehkan untuk tidak menggunakan alat perlindungan diri yang sesuai, tetapi ketika melewati batasan tersebut, seseorang diwajibkan untuk memakai alat perlindungan diri yang sesuai. Seberapa jauh jarak FPB ini tergantung dari besar energi yang dihasilkan. Semakin besar energinya maka semakin jauh pula jarak amannya, demikian sebaliknya. Nilai FPB akan dibandingkan ketika kondisi *existing*, dengan *resetting*. Data – data tersebut akan ditampilkan pada tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Data Perbandingan FPB Kondisi *Existing*, dan *Resetting*.

Bus ID	FPB <i>Existing</i> (m)	FPB <i>Resetting</i> (m)
MAIN SUBT-BUS	8,37	3,04
SMBRJO-02- BUS	5,25	3
EAST-SUBT- 03	5,25	3
EAST-SUBT- 02	41,59	12,08
PTL-MAIN- BUS	68,06	12,99

Dari tabel 4.7 diatas, terlihat bahwa jarak aman kondisi *resetting* lebih jauh dari pada kondisi *existing*. Hal ini sebanding dengan besar insiden energi untuk kedua kondisi tersebut. Ketika rele terkordinasi dan bekerja dengan cepat dalam melokalisir gangguan, jarak aman pekerja ke titik yang berpotensi terjadinya busur api akan semakin pendek.

#### 4.7 *Personal Protective Equipment* (PPE) yang Harus Digunakan

*Personal Protective Equipment* (PPE) merupakan alat perlindungan diri yang harus digunakan ketika melakukan suatu pekerjaan didaerah yang beresiko terkena busur api. Berdasarkan hasil analisa busur api yang

dilakukan untuk kondisi setelah *resetting*, maka daerah di PT. Semen Indonesia yang memiliki kategori energi pada katagori 3 standard NFPA 70E, yang artinya pada katagori yang cukup tinggi namun sudah ada alat pelindung dirinya. Jenis *personal protective equipment* (PPE) untuk kondisi setelah *resetting* dapat dilihat pada tabel 4.8. Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa perlengkapan alat perlindungan diri manusia terhadap busur api untuk kategori 3 sangat banyak. Hal ini membuktikan bahwa energi yang dihasilkan busur api sangatlah berbahaya.

Penting untuk menganalisa dan mengetahui besar energi busur api yang ada agar mengetahui jenis PPE yang tepat yang harus digunakan supaya dapat menurunkan resiko terkena dampak dari busur api bagi para pekerja terkait.

**Tabel 4.8** Jenis PPE Berdasarkan Kategori Bahaya Busur Api Setelah *Resetting*

Bus ID	Insiden Energi <i>Resetting Modified</i> (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori	Jenis PPE
MAIN SUBT-BUS	11,7223	Kategori 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pakaian lengan panjang tahan api</li> <li>• Celana panjang tahan api</li> <li>• Jaket dan celana untuk <i>arc flash</i> sesuai kategori</li> <li>• Helm pengaman sesuai kategori</li> <li>• Kacamata <i>safety</i></li> <li>• Pelindung telinga</li> <li>• Sarung tangan kulit</li> <li>• Sepatu <i>safety</i> khusus</li> </ul>
SMBRJO-02-BUS	10,6623		
EAST-SUBT-03	13,9444		
EAST-SUBT-02	15,4584		
PTL-MAIN-BUS	13,8813		

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa dari studi koordinasi proteksi dan busur api pada sistem kelistrikan di PT. Semen Indonesia, Gresik, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil plot kurva arus waktu rele pengaman untuk kondisi *existing* menunjukkan bahwa rele belum terkoordinasi dengan baik. Dimana contoh pada tipikal 2, yaitu koordinasi kurva rele R-east subt-04 masih menyentuh kurva rele R-east subt-03, sehingga R-east subt-04 akan bekerja *overlap* daripada rele R-SMBRJO-02, yang mengakibatkan urutan kerja rele menjadi tidak sesuai dan tidak selektif. Dengan *setting* waktu rele yang lambat, nilai insiden energi busur api yang didapatkan pada bus EAST-SUBT-03 adalah  $60,62 \text{ cal/cm}^2$  yang tergolong ke dalam kategori bahaya lebih dari 4, dengan waktu pemutusan 0,571 detik.
2. Rele-rele harus dilakukan *Resetting* dengan menyesuaikan *grading* waktu rele pengaman berdasarkan koordinasi proteksi menghasilkan insiden energi yang ada semakin kecil. Dengan mengambil contoh bus yang sama, yaitu bus EAST-SUBT-03, insiden energinya menjadi  $12,95 \text{ cal/cm}^2$ , yang artinya masuk pada kategori 3. berkurangnya energi dikarenakan *settingan* rele sesuai dan berkurangnya *time dial* dari rele R-east subt-03 berkurang setelah dilakukan *resetting*, sehingga waktu pemutusan pun menurun menjadi 0,122 detik.
3. Metode modifikasi digunakan untuk perhitungan energi busur api dengan perhitungannya lebih tepat dibanding dengan standar IEEE 1584-2002 dalam merepresentasikan insiden energi yang sebenarnya. Hal ini karena metode modifikasi mempertimbangkan berkurangnya kontribusi arus hubung singkat berdasarkan periode waktu hubung singkat, dan mempertimbangkan *time domain* masing – masing *circuit breaker* untuk melokalisir gangguan. Sehingga hasil perhitungan metode modifikasi seharusnya lebih kecil dari pada perhitungan dengan standard IEEE 1584-2002. Namun karena waktu peutusan yang cepat maka hasilnya kurang lebih sama. Contoh pada Bus EAST-SUBT-032 pada kondisi setelah *resetting*, insiden energi berdasarkan standard IEEE 1584-2002 adalah 12,95

cal/cm<sup>2</sup>, sedangkan dengan metode modifikasi hasilnya adalah 11.89 cal/cm<sup>2</sup>.

## 5.2 Saran

Dengan mempertimbangkan hasil studi yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, ada beberapa saran yang dapat menjadi masukan untuk kedepannya, yaitu sebagai berikut :

1. Hasil studi kedepannya dapat dilakukan analisa busur api pada sistem tegangan menengah dengan kategori kurang dari 4 yang ada di PT. Semen Indonesia, Gresik, agar dapat diketahui besar insiden energinya serta alat perlindungan diri yang sesuai bagi para pekerja.
2. Untuk hasil studi selanjutnya dapat dilakukan analisa busur api pada level tegangan rendah yang ada di PT. Semen Indonesia, Gresik. Dikarenakan besarnya insiden energinya dan didapatkan alat perlindungan diri yang sesuai bagi para pekerja.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Std 1584<sup>TM</sup> – 2002, “*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2002.
- [2] IEEE Std 551<sup>TM</sup> – 2006, “*IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 2, 2006.
- [3] Lazar, Irwin, “*Electrical System Analysis and Design for Industrial Plants*”, McGraw-Hill, Inc., USA, Ch.1, Ch.4, 1980.
- [4] Wahyudi, “*Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 1, 2014.
- [5] IEEE Std 242<sup>TM</sup> – 2001, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 4, Ch. 15, 2001.
- [6] Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga, “*Modul Pelatihan Koordinasi Pengaman*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, 2014.
- [7] Jones, Ray. A, “*Safety BASICS<sup>TM</sup> Handbook for Electrical Safety Edition 2*”, Cooper Bussman, Inc., USA, 2004.
- [8] Wu, Alex Y., “*Modified Medium Voltage Arc Flash Incident Energy Calculation Method*”, IEEE Transaction on Industry Application, USA, 2008.
- [9] Keller, Kimberley, “*Electrical Safety Code Manual*”, Elsevier, Inc., USA, Ch. 7, 2010.
- [10] Licensed Electrician, “*PPE - Personal Protective Equipment - Arc Flash FR Clothing*”, < <http://www.licensedelectrician.com/Store/OE/Arc-Flash-Clothing.htm>>, 15 Oktober 2015.

## RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Rachmad Kusuma Putra, lahir pada 17 April 1994 di Surabaya. Penulis adalah anak kedua dari dua bersaudara. Penulis mengawali pendidikannya tahun 2000 mulai masuk di SDN Semolowaru 614 Surabaya (lulus tahun 2006), SMP Negeri 1 Surabaya (lulus tahun 2009), SMA Negeri 2 Surabaya (lulus tahun 2012). Kemudian penulis melanjutkan studi sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jurusan Teknik Elektro (FTI-ITS) dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi di email : [rachmadkusuma@yahoo.com](mailto:rachmadkusuma@yahoo.com)