



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENYEDERHANAAN ANALISA BAHAYA ARC FLASH
MENGUNAKAN KURVA BATAS ENERGI PADA PABRIK
AMUREA 2 PT.PETROKIMIA GRESIK**

Alief Nur Aisyi Maulidhia
NRP 07111540000082

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

***SIMPLIFIED ARC FLASH HAZARD ANALYSIS USING ENERGY
BOUNDARY CURVE AT PABRIK AMUREA 2 PT.
PETROKIMIA GRESIK***

Alief Nur Aisyi Maulidhia
NRP 07111540000082

Advisor Lecturer
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tugas akhir saya dengan judul "**PENYEDERHANAAN ANALISA BAHAYA ARC FLASH MENGGUNAKAN KURVA BATASAN ENERGI PADA PABRIK AMUREA 2 PT. PETROKIMIA GRESIK**" adalah benar – benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan – bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia, menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2018



Alief Nur Aisyi Maulidhia
NRP: 0711154000082

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENYEDERHANAAN ANALISA BAHAYA ARC FLASH
MENGUNAKAN KURVA BATAS ENERGI PADA
PABRIK AMUREA 2 PT.PETROKIMIA GRESIK**

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,



Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

Dosen Pembimbing II,



Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.
NIP. 198811082012121001



Halaman ini sengaja dikosongkan

PENYEDERHANAAN ANALISA BAHAYA ARC FLASH MENGGUNAKAN KURVA BATAS ENERGI PADA AMUREA 2 PT. PETROKIMIA GRESIK

Nama Mahasiswa : Alief Nur Aisyi Maulidhia
NRP : 0711154000082
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

ABSTRAK

Fenomena busur api pada sistem kelistrikan memerlukan analisa guna menjamin keselamatan pekerja. Metode yang bisa digunakan untuk analisa bahaya busur api adalah menggunakan standart IEEE 1584-2002. Jika menggunakan metode ini, memerlukan banyak parameter yang diperlukan untuk menentukan kategori PPE (*Personal Protective Equipment*). Sehingga, bila sistem kelistrikan tersebut terdapat banyak bus, maka akan memakan banyak waktu untuk menentukan kategori PPE. Untuk itu, pada tugas akhir ini digunakan metode lain sebagai metode pembanding yaitu dengan menggunakan metode kurva batas energi. Dengan menggunakan metode kurva batas energi, maka untuk penentuan kategori PPE hanya memerlukan kurva karakteristik pengaman bus. Kurva tersebut, akan dipotongkan dengan kurva batas energi. Studi aktual mengenai penyederhanaan analisa busur api dilakukan pada pabrik Amurea 2. Dimana pada hasil akhirnya, analisa busur api dengan menggunakan metode kurva batas energi didapatkan proses penentuan kategori PPE yang lebih singkat daripada standart IEEE 1584-2002, namun menimbulkan perbedaan jarak batas aman.

Kata kunci: busur api, kurva batas energi, personal protective equipment, IEEE 1584-2002

Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMPLIFIED ARC FLASH HAZARD ANALYSIS USING ENERGY BOUNDARY CURVES AT AMUREA 2 PT.PETROKIMIA GRESIK

Name of student : Alief Nur Aisyi Maulidhia
NRP : 07111540000082
Advisor Lecturer : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng.
2. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

ABSTRACT

One of the factors that be the concern of safety in exposed areas of electrical energy is the phenomenon of the arc flash. One of the method that could be used is the IEEE 1584-2002 standard. Where this method needs some parameters that has to be analyzed to perform the suitable PPE (Personal Protective Equipment) category. So, if this method is applied in large electrical system where there are many buses on it, it needs more time to determines the PPE category. By that problem, in this final project, will used another method as a comparison. This method called as simplified arc flash hazard analysis using energy boundary curves. With this method, the way to determine PPE category only using the relay time-current characteristic on the bus that being analyzed. The relay characteristic, will intersected with the energy boundary curves. The actual studies regarding to simplification arc flash analysis conducted at Amurea 2. Where at the end of the result, the analysis of the arc flash using energy boundary curve, showed a reduction in the amount of data-collection requirements and analysis time required than using IEEE 1584-2002 standard. But it gives a different result in flash protection boundary.

Keywords: arc flash, energy boundary curve, personal protective equipment, IEEE 1584-2002

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, terucap syukur kehadiran Allah atas segala limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul:

Penyederhanaan Analisa Bahaya Arc Flash Menggunakan Kurva Batas Energi Pada Pabrik Amurea 2 PT. Petrokimia Gresik

Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah guna memenuhi persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu:

1. Allah SWT yang telah memberikan kekuatan dan petunjuk sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Suami Tercinta Rachmad Firdhaus Pujiantara
3. Bapak, Ibu, Mama, Papa yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa.
4. Bapak Ardyono Priyadi, S.T.,M Eng.,Dr.Eng dan bapak Dr. Dimas Fajar Uman Putra,ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
5. Seluruh teman - teman Lipist atas kebersamaan dan kerjasamanya.
6. Seluruh teman - teman e55 atas dukungannya

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari setiap pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan kearah yang lebih baik.

Surabaya, Desember 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

JUDUL

LEMBAR PERNYATAAN

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Tugas Akhir	2
1.5. Metode Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	3
1.7. Relevansi.....	4

BAB 2 DASAR TEORI

2.1. Definisi Busur Api.....	5
2.2. Perhitungan Energi Busur Api Menggunakan Standart IEEE 1584-2002	6
2.3. Metode Perhitungan Busur Api dengan Kurva Batas Energi	8
2.4. <i>Lee Method</i>	10
2.5. <i>Personal Protective Equipment</i>	11
2.6. Jarak Aman Perlindungan (<i>Flash Protection Boundaries</i>)	13

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. LINDE

3.1. Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik Pabrik Amurea 2.....	16
3.2. Sistem Kelistrikan PT.Petrokimia Gresik Pabrik Amurea 2.....	18
3.3. Klasifikasi Pembebanan Pabrik Amurea 2 PT. Petrokimia Gresik.....	18
3.4. Pemilihan Tipikal Koordinasi pada PT.Petrokimia Gresik Pabrik Amurea 2.....	19
• Tipikal 1	20

• Tipikal 2	21
• Tipikal 3	22
• Tipikal 4	23

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA

4.1. Analisa Busur Api.....	24
4.2. Perhitungan Busur Api Menggunakan Standart IEEE 1584-2002.....	24
• BUS 11Kv MVSWGR.....	26
• BUS 21B 6,3kV	26
• BUS 22EM 6,3kV	27
• BUS 21A 6,3kV	27
• BUS 15	28
• BUS 164	29
• BUS 11A 20kV	29
• BUS 20Kv MVSWGR.....	30
• BUS 125 20Kv.....	30
4.3. Perhitungan Busur Api Menggunakan Metode Kurva Batasan Energi.....	31
4.3.1. Penentuan Kurva Batasan Energi Pada Level Tegangan 1-15 kV.....	31
4.3.2. Penentuan Kurva Batasan Energi Untuk Level Tegangan Lebih Dari 15 kV	34
4.3.3. Perhitungan Jarak Aman Batas Perlindungan	36
4.3.4. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 11Kv MVSWGR	37
4.3.5. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 20Kv MVSWGR	39
4.3.6. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 11A 20 kV	41
4.3.7. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 21b 6,3kV.....	43
4.3.8. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 22EM 6,3kV	45
4.3.9. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 21A 6,3kV	47
4.3.10 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 15	49

4.3.11. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 164.....	51
4.3.12. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 125.....	53
4.4. Perbandingan Antara Perhitungan Menggunakan IEEE 1584-2002 dan Dengan Menggunakan Kurva Batasan Energi ...	55
BAB 5 PENUTUP	
5.1. Kesimpulan	61
5.2. Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	63
BIODATA PENULIS	65

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	flash protection boundaries.....	14
Gambar 3.1	Single line diagram pabrik Amurea 2.....	18
Gambar 3.2	Pemilihan tipikal koordinasi pada pabrik Amurea 2	20
Gambar 3.3	Tipikal koordinasi 1.....	21
Gambar 3.4	Tipikal koordinasi 2.....	22
Gambar 3.5	Tipikal koordinasi 3.....	23
Gambar 3.6	Tipikal koordinasi 4.....	24
Gambar 4.1	kurva batas energi level tegangan 1-15 kV.....	35
Gambar 4.2	Kurva batasan energi pada level tegangan lebih dari 15kV.....	37
Gambar 4.3	Rele 4 sebagai pengaman bus 11Kv MVSWGR.....	39
Gambar 4.4	Kurva rele 4 dengan kurva batasan energi pada level tegangan 1-15kV.....	40
Gambar 4.5	Rele 5 sebagai pengaman bus 20Kv MVSWGR.....	41
Gambar 4.6	Kurva rele 5 dengan kurva batasan energi untuk level tegangan lebih dari 15kV....	42
Gambar 4.7	Rele 12 sebagai rele pengaman bus 20kV BUS-11A.....	43
Gambar 4.8	Kurva rele 11 dengan kurva batasan energi untuk level tegangan lebih dari 15 kV...	44
Gambar 4.9	Rele 18 sebagai rele pengaman utama pada bus 21B.....	45
Gambar 4.10	Kurva rele 18 dengan kurva batasan energi 1-15kV.....	46
Gambar 4.11	Rele 17 sebagai rele pengaman utama pada bus 22EM.....	47
Gambar 4.12	Kurva rele 17 dengan kurva batasan energi 1-15kV.....	48
Gambar 4.13	Rele 17 sebagai rele pengaman utama bus 6,3kV BUS-21A.....	49
Gambar 4.14	Kurva rele 17 dengan kurva batas energi 1-15 kV.....	50
Gambar 4.15	Rele 3 sebagai rele pengaman utama bus 15.....	51
Gambar 4.16	Kurva rele 3 dengan kurva batas	

	energi dengan level tegangan 1-15kV.....	52
Gambar 4.17	Rele 13 sebagai rele pengaman pada bus 164.....	53
Gambar 4.18	Kurva rele 13 dengan kurva batasan energi untuk level tegangan lebih dari 15kV.....	54
Gambar 4.19	Rele 14 sebagai rele pengaman pada bus 125.....	55
Gambar 4.20	Kurva rele 14 dengan kurva batasan energi untuk level tegangan lebih dari 15kV.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel data jarak celah bus (Jarak Bus).....	7
Tabel 2.2 Tabel data parameter-parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan insiden energi.....	8
Tabel 2.3 <i>Personal Protective Equipment</i>	11
Tabel 3.1 Data transformator pada pabrik Amurea 2.....	19
Tabel 4.1 Data arus gangguan bolted dan FCT.....	26
Tabel 4.2 Hasil perhitungan busur api menggunakan standart IEEE 1584-2002.....	26
Tabel 4.3 Perbandingan perhitungan menggunakan IEEE 1584-2002 dengan Kurva batasan energi.....	57
Tabel 4.4 Perbandingan Perhitungan menggunakan software Dengan kurva batas energi.....	57
Tabel 4.5 Standart NFPA-70E 2015 berdasarkan kategori PPE Masing-masing bus.....	59
Tabel 4.6 Perbandingan metode IEEE 1584-2002 dengan kurva Batas energi.....	61
Tabel 4.7 Hasil simulasi Arc Flash sebelum menggunakan relay Diferential.....	62
Tabel 4.8 Hasil simulasi Arc Flash setelah menggunakan relay Diferential.....	62

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Petrokimia Gresik adalah industri besar yang memproduksi berbagai macam produk pupuk dan produk non pupuk. PT. Petrokimia Gresik saat ini memiliki 5 pabrik, yaitu pabrik 1, pabrik 2, pabrik 3A, pabrik 3B, dan pabrik Amurea 2. Setelah adanya proyek pembangunan *Independent Power Producer* (IPP), pabrik Amurea 2 disuplai oleh *grid* PLN 150 kV yang dikonversi menjadi tegangan 20 kV di Gardu Induk PT. Petrokimia Gresik dan generator GGCP dengan kapasitas 26,8 MW. Perlu diketahui besarnya energi yang dihasilkan oleh gangguan busur api apakah gangguan tersebut melebihi standar yang diizinkan atau tidak, hal ini di lakukan untuk menjaga keamanan dan keselamatan pekerja.

Beberapa faktor yang dapat menyebabkan kegagalan antara lain adalah kesalahan koordinasi proteksi, kegagalan transient, harmonisa, adanya busur api dll. Dimana pada tugas akhir ini secara khusus akan menganalisa fenomena busur api atau *arc flash* pada PT. Petrokimia Gresik.

Arc flash awal mula muncul diakibatkan dari adanya *arcing fault*. *Arcing fault* dapat didefinisikan sebagai aliran arus listrik yang mengalir pada saluran yang seharusnya tidak teraliri arus (*arcing fault current*). *Arcing fault current* tersebut menimbulkan sebuah plasma busur listrik dan melepaskan sejumlah energi yang berbahaya. Busur api listrik merupakan bagian dari arus listrik yang besar melalui udara yang terionisasi.[8] *Arc flash* diakibatkan dari *arcing fault* diantara fase bus-bar atau dengan netral (*ground*). Selama *arc fault* terjadi udara merupakan konduktor. Besar *arcing fault current* biasanya lebih rendah dari besar arus *bolted fault* dan di bawah *rating circuit breaker*. [9]

Metode yang digunakan untuk menganalisa fenomena busur api pada tugas akhir ini adalah menggunakan kurva batasan energi (*energy boundary curves*). Secara umum, metode ini mempersingkat analisa penentuan kategori PPE yang ditentukan dari insiden energi yang dihasilkan oleh fenomena busur api. Jika perhitungan tersebut diterapkan pada

sistem kelistrikan yang terdapat banyak bus, maka perhitungan tersebut membutuhkan waktu yang lama. Berdasarkan hal tersebut maka digunakan perhitungan busur api dengan menggunakan metode kurva batas energi. Dengan menggunakan metode kurva batas energi maka data yang diperlukan lebih sedikit dan waktu pengerjaannya lebih singkat

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah :

1. Analisa bahaya arc flash dengan metode kurva batas energi
2. Analisa bahaya arc flash menggunakan metode standard IEEE 1584-2002

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memodelkan, mensimulasikan dan mengevaluasi unjuk kerja sistem berdasarkan permasalahan bahaya arc flash.
2. Level tegangan bus yang dianalisa hanya pada level tegangan menengah.
3. Membuktikan bahwasanya dengan menggunakan metode kurva batas energi dapat mempermudah penentuan kategori PPE

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memodelkan, mensimulasikan dan mengevaluasi unjuk kerja sistem berdasarkan permasalahan bahaya arc flash.
2. Membuktikan bahwasannya dengan menggunakan metode kurva batas energi dapat mempermudah perhitungan analisa bahaya arc flash.

1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah :

1. Studi literatur
Pada tugas akhir ini, studi yang dilakukan adalah mengenai analisa busur api menggunakan metode standart IEEE 1584 - 2002 dan analisa perhitungan arc flash menggunakan kurva batasan energi.
2. Pengumpulan data
Mengumpulkan data sistem kelistrikan yang digunakan PT. Petrokimia Gresik.
3. Pemodelan dan Simulasi
Pemodelan sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dengan menggunakan *software* ETAP. Simulasi kurva batas energi dengan menggunakan software ETAP STAR
4. Analisa data dari hasil pemodelan sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik untuk kemudian didapatkan *Personal Protection Equipment* (PPE) yang harus digunakan. Sebagai dasar bahaya arc flash yang digunakan mengacu dari National Fire Protection Association (NFPA) 70E-2015.
5. Berisi mengenai kesimpulan dari tugas akhir yang telah dikerjakan dan saran yang dapat dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini disusun menjadi beberapa bab dan diuraikan dengan pembahasan sesuai daftar isi. Sistematika penyusunan laporannya adalah sebagai berikut :

Bab 1 PENDAHULUAN

Penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan penulisan, metodologi penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.

- Bab 2 **DASAR TEORI**
Membahas pengertian arc flash, perhitungan arc flash sesuai standar IEEE 1584-2002 dan perhitungan arc flash dengan metode kurva batas energi.
- Bab 3 **SISTEM KELISTRIKAN AMUREA 2**
Bab ini berisi penjelasan sistem kelistrikan pada Amurea 2
- Bab 4 **SIMULASI DAN ANALISI**
Bab ini menjelaskan mengenai pembuktian analisa bahaya arc flash dengan etode kurva batas energy dapat mempercepat perhitungan pada Amurea 2
- Bab 5 **PENUTUP**
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran

1.7 Relevansi

Penulisan Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

- 1) Dapat digunakan sebagai referensi PT. Petrokimia Gresik dalam penentuan standar PPE untuk pekerja listrik
- 2) Dapat mempermudah dalam penentuan kategori PPE dalam mengatasi bahaya Arc-Flash jika menggunakan metode kurva batas energi

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Definisi Busur Api (*Arc Flash*)

Pada awal mula arc flash muncul diakibatkan adanya arcing fault. Arcing fault sendiri dapat didefinisikan sebagai busur api yang muncul akibat dari arus gangguan atau dengan kata lain terjadi kontak langsung dengan konduktor. Arcing fault biasanya terjadi pada tegangan lebih dari 120V, lebih rendah dari besar arus *bolted fault*, dan dibawah rating *circuit breaker*. Arus tersebut menimbulkan sebuah plasma energi yang berbahaya [1]. Arc Flash yang terjadi, dapat menghasilkan temperatur udara disekitarnya menjadi 35000° F. Terjadinya arc flash ini, juga diikuti oleh kilatan cahaya yang dapat mengganggu penglihatan dan bahkan juga dapat merusak mata seseorang. Selain itu, arc flash juga dapat menghasilkan ledakan yang sangat keras serta dapat menyebabkan luka bakar bagi pekerja yang terpapar didaerah kejadian [2].

Beberapa hal yang dapat menyebabkan terjadinya peristiwa busur api adalah debu, pengurangan, binatang, spark discharge dari sentuhan, kegagalan isolasi dari peralatan, kegagalan kerja peralatan pengaman. Faktor – faktor yang dapat mempengaruhi besarnya energi arc flash yang dapat terjadi[3] diantaranya adalah level tegangan, jarak antar konduktor, dan juga waktu kerja rele untuk mengisolasi gangguan yang terjadi. Selain itu, besar energi busur api yang dihasilkan tergantung dari waktu kerja sistem pengaman akibat gangguan arus hubung singkat. Semakin cepat rele pengaman bekerja semakin kecil pula busur api yang dihasilkan dan berlaku sebaliknya. Oleh karena itu, studi untuk mengetahui besar energi busur api yang dihasilkan pada masing-masing *switchgear* perlu dilakukan untuk memberikan peringatan kepada para pekerja maupun orang disekitarnya akan dampak yang ditimbulkan serta perlengkapan keselamatan yang harus dikenakan sebagai langkah pencegahan agar terhindar dari jatuhnya korban jiwa[4].

2.2 Perhitungan Energi Busur Api Menggunakan Standart IEEE 1584-2002 [1]

Pada metode ini, hal pertama yang harus diperhitungkan adalah mencari nilai dari arus *arcing fault*. Persamaan untuk menghitung dari arus arcing fault sendiri, ada 2, yaitu tergantung dari besarnya level tegangan bus.

Untuk aplikasi dengan sistem tegangan dibawah 1000 Volt digunakan rumus berikut[5] :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf}) \dots\dots\dots(2.1)$$

Sedangkan untuk tegangan diatas 1000 Volt digunakan rumus :

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \dots\dots\dots(2.2)$$

Lalu nilai I_a dapat diperoleh :

$$I_a = 10^{\lg I_a} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

- \lg = \log_{10}
- I_a = arus arcing (kA)
- K = konstanta untuk konfigurasi terbuka = -0,153 dan konstanta untuk konfigurasi box = -0,097
- $\lg I_{bf}$ = bolted fault current pada gangguan tiga fase (symmetrical RMS) (kA)
- V = tegangan sistem (kV)
- G = jarak celah antar konduktor (mm)

Dalam perhitungan besar energy yang normal, menggunakan referensi waktu *arcing* dengan durasi 0,2 detik dan jarak dari titik *arcing* ke manusia sebesar 610 mm. Untuk menghitung besarnya *incident energy* dapat menggunakan rumus berikut:

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

- E_n = *incident energy normalized* untuk waktu dan jarak (J/cm^2)
- K1 = -0,792 untuk konfigurasi terbuka (*no enclosure*)
-0,555 untuk konfigurasi *box (enclosed equipment)*
- K2 = 0 untuk sistem *ungrounded and high-resistance grounded*
-0,113 untuk sistem *grounded*
- G = jarak/celah antar konduktor (mm)

Untuk mendapatkan nilai G (jarak antar konduktor) dapat mengikuti standar yang sudah ada. Peralatan yang digunakan dalam sistem kelistrikan. Dalam tabel 2.1 dijelaskan untuk jarak celah bus pada beberapa peralatan lain dengan referensi dari IEEE 1584-2002.

Tabel 2.1: Tabel data jarak celah bus (Jarak Bus) [1]

Kelas Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)
<i>6-15kV Switchgear</i>	153
<i>5kV Switchgear</i>	102
<i>Low voltage switchgear</i>	32
<i>Low voltages MCCs and panelboards</i>	25
<i>Cable</i>	13
<i>Other</i>	<i>Not required</i>

Selanjutnya besar energy E_n dapat diketahui:

$$E_n = 10^{\lg E_n} \dots\dots\dots(2.5)$$

Setelah nilai E_n didapatkan, untuk menghitung besar insiden energi digunakan persamaan :

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

Dimana :

- E = *incident energy* (J/cm^2)
- C_f = faktor pengali
1,0 untuk tegangan diatas 1kV, dan
1,5 untuk tegangan dibawah 1kV

- E_n = incident energy normalized
 T = waktu *arcing* (detik)
 D = jarak kerja (mm)
 X = jarak exponent berdasarkan table 2.2

Table 2.2 : parameter-parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan insiden energi [1]

Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)	Jarak eksponent	Jarak kerja (mm)
0,208 – 1	<i>Open air</i>	10–40	2	-
	<i>Switchgear</i>	32	1,473	455
	<i>MCC and panels</i>	25	1,641	455
	<i>Cable</i>	13	2	455
> 1 – 5	<i>Open air</i>	102	2	-
	<i>Switchgear</i>	13–102	0,973	610
	<i>Cable</i>	13	2	455
>5 – 15	<i>Open air</i>	13–153	2	-
	<i>Switchgear</i>	153	0,973	910
	<i>Cable</i>	13	2	455

2.3 Metode Perhitungan Busur Api dengan Kurva Batas Energi

Pengertian insiden energi menurut IEEE 1584 didefinisikan sebagai jumlah energi yang besar di permukaan, pada jarak tertentu dari sumber, yang dihasilkan selama terjadinya busur listrik. Pada tegangan 1kV sampai dengan 15 kV besarnya insiden energi dalam sistem tenaga listrik dapat dirumuskan sesuai dengan persamaan (2.6). Dimana pada persamaan tersebut, nilai dari E_n dan t akan bergantung pada besarnya arus gangguan pada lokasi yang dipertimbangkan dan karakteristik dari

peralatan proteksi arus lebih (OCPD) pada bagian *upstream*. Persamaannya (2.6) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$t = \frac{E}{A_1 E_n} \text{ (detik)} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana A_1 adalah konstanta, dituliskan sebagai berikut:

$$A_1 = 4,184 \frac{C_f}{0,2} \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \dots \dots \dots (2.8)$$

IEEE 1584 menjelaskan insiden energi normalisasi (E_n) seperti pada persamaan (2.4). Dimana pada persamaan tersebut terdapat beberapa konstanta yaitu :

- K_1 = konstanta yang berhubungan dengan peralatan (-0,792) untuk konfigurasi “open-air”; -0,555 untuk peralatan tertutup),
- K_2 = konstanta yang tergantung pada grounding sistem (-0,113 untuk sistem dengan grounding; 0 untuk sistem yang tidak digrounding atau untuk sistem dengan impedansi grounding),
- I_a = arus gangguan arcin (kA),
- G = jarak celah antar konduktor (mm).

Dengan menggabungkan persamaan (2.7) dengan persamaan (2.4) maka diperoleh persamaan kurva batas energi sebagai berikut:

$$t = \frac{E}{A_1 A'2 I_a^{1,081}} \text{ (detik)} \dots \dots \dots (2.9)$$

Untuk nilai I_a nya sendiri didapatkan dari rumus sebagai berikut:

$$I_a = \sqrt[1,081]{\frac{E}{A_1 A'2 t}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dengan rentang waktu t : 0,01s -2s

Dimana nilai waktu 2 detik ini berdasarkan ketentuan B.1.2 dari IEEE 1584. Ketentuan atau klausul B.1.2 IEEE 1584 menyatakan bahwa waktu 2 detik merupakan waktu yang “layak” atau “masuk akal” sebagai durasi maksimum untuk analisa busur api.

Dimana A_2 adalah konstan yang dituliskan sebagai berikut

$$A_2 = K_1 + K_2 + 0,0011 G \dots \dots \dots (2.11)$$

$$A'_2 = 10^{A_2} \dots \dots \dots (2.12)$$

Setelah konstanta didefinisikan berdasarkan pada peralatan dan konfigurasi sistem, nilai insiden energi E dapat dipilih berdasarkan

kategori 1-4 PPE sesuai NFPA 70E-2015, dan persamaan (2.9) dapat digunakan untuk menentukan hubungan arus-waktu yang sesuai dengan tingkat energi insiden yang dipilih. Seperti ditunjukkan dalam kurva yang menghubungkan poin arus-waktu sesuai dengan tingkat insiden energi yang diberikan muncul linear pada grafik log-log. Persamaan (2.9) dapat diterapkan dilokasi dalam kisaran IEEE 1584 dengan range penerapan (208V - 15 kV, tiga fase, dan dengan tingkat arus bolted fault 700A-106 kA).

2.4 *Lee Method*

Untuk lokasi yang berada di luar jangkauan persamaan (2.6), nilai tegangan diatas 15kV, metode Lee dapat digunakan untuk menentukan kurva batas energi. Sehingga insiden energi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E = 2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

- V = level tegangan (kV)
- I_{bf} = bolted fault current (kA)
- t = waktu arcng (detik)
- D = jarak dari kemungkinan titik arcng ke orang kerja (mm)
- E = incident energy (J/cm²)

Dan persamaan (2.13) kurva batas energinya menjadi sebagai berikut:

$$t = \frac{E D^2}{2,142 \times 10^6 V I_{bf}} \dots\dots\dots(2.14)$$

Perbedaanya dengan persamaan (2.9), persamaan (2.14) berdasarkan pada arus bolted fault, tetapi nilai arus gangguan arcng masih diperlukan untuk menentukan lamanya waktu arus arcng. Jumlah energi yang dihasilkan *arc-flash* tergantung dari level tegangan tempat arus gangguan terjadi, jarak pekerja dengan sumber arcng dan waktu yang dibutuhkan peralatan pengaman arus lebih untuk menghilangkan dan mengisolir gangguan.

2.5 *Personal Protective Equipment* [6]

Personal protective equipment ini, diklasifikasikan berdasarkan insiden energi yang terjadi ketika peristiwa busur api sedang berlangsung. Hal ini sesuai dengan standart NFPA 70E – 2015. Dimana standart tersebut memberikan kategori insiden energi serta dampak yang akan diterima seseorang bila terpapar busur api. NFPA 70E – 2015 juga menyertakan peralatan yang harus diperlukan atau digunakan ketika seseorang berada pada zona yang berpotensi terjadi busur api.

Plotting kurva karakteristik rele serta kurva batasan energi yang telah dilakukan, dapat menentukan kategori PPE yang harus diterapkan oleh seseorang ketika akan memasuki suatu wilayah elektrik tertentu. Berikut merupakan table PPE sesuai dengan standart NFPA 70E – 2015

Tabel 2.3 *Personal Protective Equipment*[6]

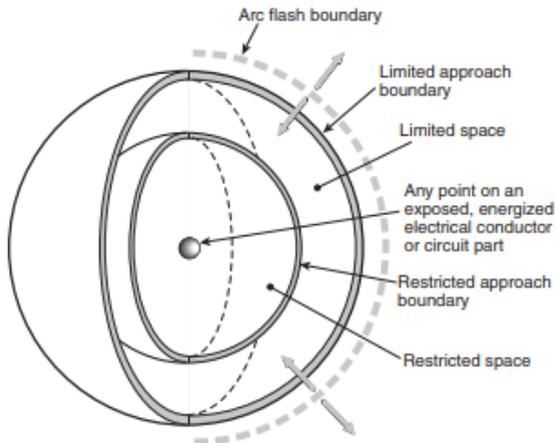
Bentuk PPE	Kategori Resiko Bahaya	Persyaratan minimum <i>arc rating</i> (Cal/cm ²)	Perlengkapan Perlindungan
	1	4	<ul style="list-style-type: none">- Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka- kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata- Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar- sarung tangan kulit yang tebal- sepatu kulit (jika di perlukan)

	2	8	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sarung tangan kulit yang tebal - sepatu kulit
	3	25	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika di perlukan)

	4	40	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika diperlukan)
---	---	----	---

2.6 Jarak Aman Perlindungan (*Flash Protection Boundaries*) [6]

Definisi dari jarak aman perlindungan sesuai penjelasan dari NFPA 70E-2015 adalah sebuah pendekatan mengenai batas dimana seseorang akan menerima luka bakar tingkat dua jika terkena busur api. Ada beberapa zona yang terdapat dalam insiden busur api. Bila diibaratkan seperti sebuah bola, maka *flash protection boundaries* merupakan suatu bola berlapis, dimana lapisan terdalam merupakan zona yang sangat berbahaya. Bila seseorang berada pada zona ini, maka bisa dipastikan ia akan terpapar energi busur api dan akan mengalami luka bakar tingkat dua. *Flash Protection Boundary* juga mendefinisikan tingkat *incident energi* sebagai jumlah energi pada permukaan dan jarak tertentu dari sumber yang dihasilkan selama acara insiden busur api.



Gambar 2.1 *flash protection boundaries*[6]

Dari gambar diatas, dapat dijelaskan bagian – bagian *flash protection boundaries*, yaitu :

- *Prohibited approach boundary*: batas pendekatan pada jarak dari peralatan langsung. Bekerja dibagian ini dianggap sama dengan membuat kontak dengan bagian bertegangan.
- *Restricted approach boundary*: batas pendekatan pada jarak dari bagian bertegangan di mana ada peningkatan risiko shock, karena busur listrik gerakan yang tidak disengaja dari karyawan yang bekerja di dekat bagian tersebut
- *Limit approach boundary*: batas pendekatan pada jarak dari bagian bertegangan di mana terdapat bahaya sengatan listrik
- *Arc Flash boundary*: batas pendekatan pada jarak dari bagian terbuka di mana seseorang bisa menerima tingkat dua terbakar jika busur api terjadi.

Persamaan untuk perhitungan jarak aman perlindungan berdasarkan IEEE 1584 mengacu pada besarnya insiden energi normalisasi dari busur api. Namun ketika menggunakan analisa metode kurva batas energi, nilai tepat mengenai insiden energi normalisasi tidak dihitung. Bagaimanapun akhirnya untuk menghitung jarak aman pekerja

tetap harus dilakukan. Perhitungannya kali ini mengacu pada besarnya nilai insiden energi pada tiap tiap katagori. Sehingga yang diperoleh adalah nilai jarak maksimum untuk setiap masing masing katagori. Perhitungan level insiden energi (EW_D) untuk sistem tegangan antara 1-15Kv pada jarak kerja (D_{WD}) adalah:

$$EW_D = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^{xWD}}\right) \dots\dots\dots(2.15)$$

Sedangkan perhitungan level insiden energi (E_B) pada jarak aman perlindungan (D_B) adalah.

$$E_B = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^{xB}}\right) \dots\dots\dots(2.16)$$

Jika persamaan (2.17) diatas dibagi dengan persamaan (2.18) maka :

$$\frac{E_B}{EW_D} = \left(\frac{D_B}{D_{WD}}\right)^{-x} \dots\dots\dots(2.17)$$

Sehingga untuk mencari jarak aman tiap kategori PPE :

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{EW_D}}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Sedangkan untuk sistem lebih dari 15 kV sebagai berikut :

$$D_B = \frac{D_{WD}}{2 \sqrt{\frac{E_B}{EW_D}}} \dots\dots\dots(2.19)$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

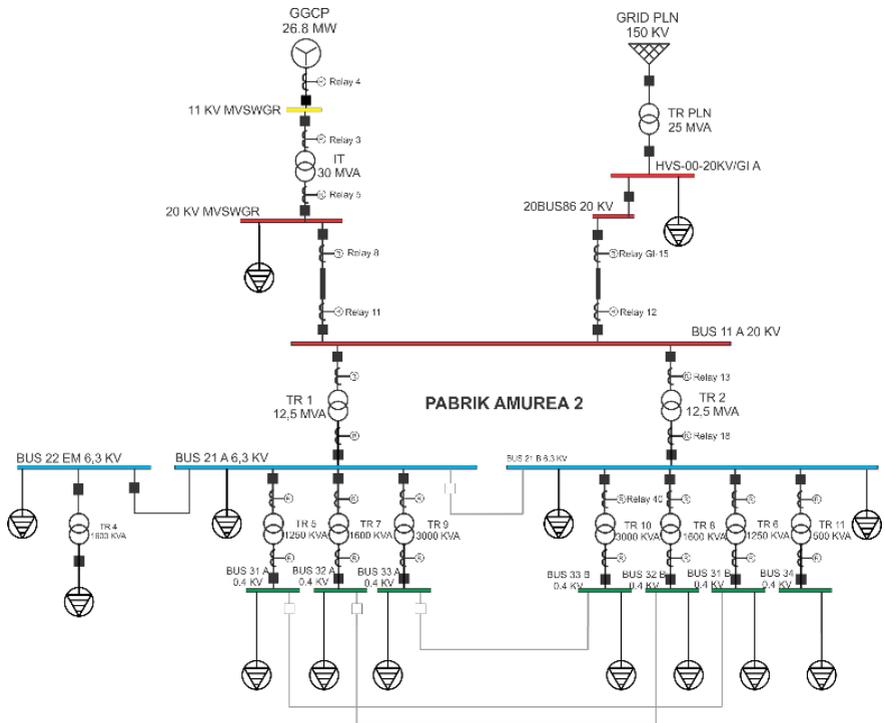
BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK PABRIK AMUREA 2

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik Pabrik Amurea 2

PT. Petrokimia Gresik merupakan salah satu produsen pupuk terbesar di Indonesia yang berlokasi di Kabupaten Gresik, Provinsi Jawa Timur. PT. Petrokimia Gresik mempunyai jaringan sistem kelistrikan yang terbilang cukup besar dan kompleks. Pada PT. Petrokimia Gresik, terdapat lima area pabrik, yaitu Pabrik 1, Pabrik 2, Pabrik 3A, Pabrik 3B, dan area Amurea 2 yang baru ditambahkan pada proyek *Independent Power Producer (IPP)*. Sistem kelistrikannya menggunakan konfigurasi radial, dimana hampir semua area pabrik PT. Petrokimia Gresik telah terintegrasi antara satu pembangkit dengan pembangkit yang lainnya, kecuali untuk area Pabrik 3A yang dalam kondisi normalnya beroperasi *islanding*. Pada Pabrik Amurea 2, sistem kelistrikan merupakan sistem radial yang disuplai oleh dua buah sumber, yaitu generator GGCP dengan *rating* sebesar 26,8 MW, dan oleh *grid* PLN. *Single line diagram* Pabrik Amurea 2 dapat dilihat pada gambar 3.1.

Single line diagram dari PT. Petrokimia Gresik Pabrik Amurea 2 dapat ditampilkan sebagai berikut :



Gambar 3.1 Single line diagram Pabrik Amurea

3.2 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik Pabrik Amurea 2

Sistem distribusi listrik pada Pabrik Amurea merupakan sistem distribusi radial yang disuplai oleh dua buah sumber, yaitu generator GGCP sebesar 26,8 MW dan *grid* PLN.

Pada Pabrik Amurea 2, sistem kelistrikan didistribusikan dalam beberapa nilai tegangan yang berbeda, yaitu : 20 kV, 11 kV, 6,3 kV, dan 0,4 kV. Untuk mengkonversi tegangan tersebut, terdapat transformator *step-up* dan transformator *step-down*. Data masing-masing transformator yang digunakan pada Pabrik Amurea 2 dapat dilihat pada tabel 3.1. berikut :

Tabel 3.1 Data Tranformator pada Pabrik Amurea 2

ID Trafo	MVA	kV	%Z	X/R	Hubungan
IT	30	11/20	11	1,5	<i>delta/wye</i>
TR1	12,5	20/6,3	7,5	13	<i>delta/wye</i>
TR2	12,5	20/6,3	7,5	13	<i>delta/wye</i>
TR4	1,6	6,3/0,4	6,25	6	<i>delta/wye</i>
TR5	1,25	6,3/0,4	4,5	3,5	<i>delta/wye</i>
TR6	1,25	6,3/0,4	4,5	3,5	<i>delta/wye</i>
TR7	1,6	6,3/0,4	5,5	10	<i>delta/wye</i>
TR8	1,6	6,3/0,4	5,5	10	<i>delta/wye</i>
TR9	3	6,3/0,4	7	10	<i>delta/wye</i>
TR10	3	6,3/0,4	7	10	<i>delta/wye</i>
TR 11	0,5	6,3/0,4	4	1,5	<i>delta/wye</i>
TR PLN	25	150/20	10	23,7	<i>delta/wye</i>

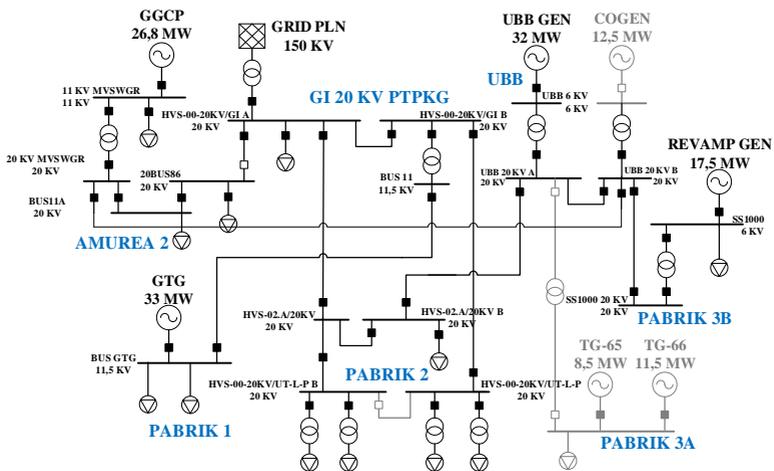
3.3 Klasifikasi Pembebanan Pabrik Amurea 2 PT. Petrokimia Gresik

Pabrik Amurea 2 terhubung dengan generator GGCP dengan *rating* sebesar 26,8 MW dan *grid* PLN. Pada operasi normal, Generator GGCP menyuplai daya sebesar 22 MW + 11,1 MVAR ke sistem, sedangkan total kebutuhan daya Pabrik Amurea 2 adalah sebesar 11 MW + 2,8

MVAR. sehingga kelebihan daya akan disalurkan ke sistem interkoneksi 20 kV PT. Petrokimia Gresik.

3.4 Pemilihan Tipikal Koordinasi pada PT. Petrokimia Gresik Pabrik Amurea 2

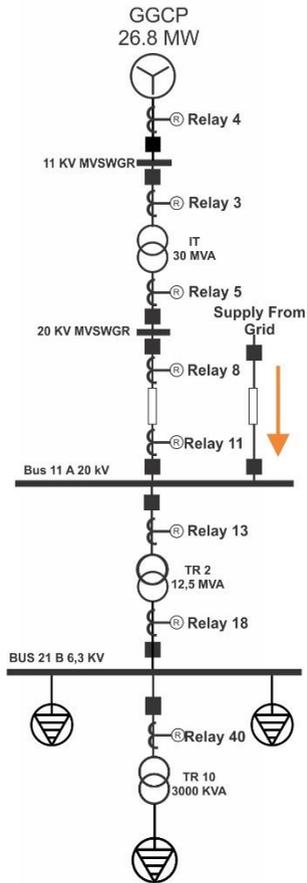
Untuk mempermudah melakukan koordinasi proteksi, maka dipilih tipikal koordinasi, dimana tipikal tersebut dapat merepresentasikan sistem kelistrikan *plant* yang digunakan. Pada *plant* Pabrik Amurea 2, dipilih dua buah tipikal sebagai berikut :



Gambar 3.2 Pemilihan Tipikal Koordinasi pada Pabrik Amurea 2

- **Tipikal 1**

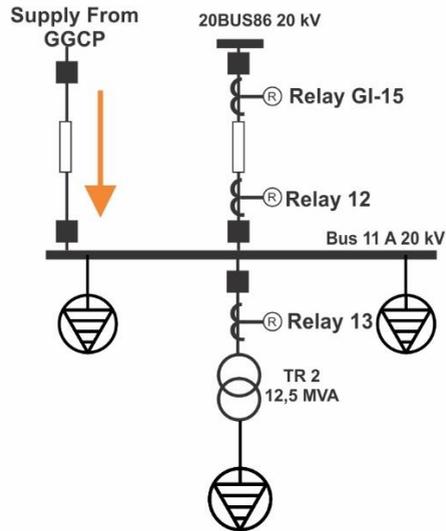
Tipikal 1 adalah koordinasi dari beban di pabrik Amurea 2 hingga ke generator GGCP 26,8 MW. Dimulai dari rele 40, rele 18, rele 13, rele 11, rele 8, rele 5, rele 3 dan rele 4.



Gambar 3.3 Tipikal Koordinasi 1

- **Tipikal 2**

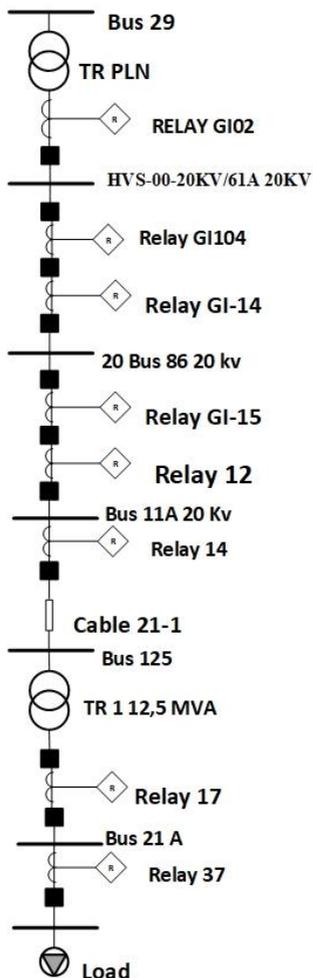
Tipikal 2 adalah koordinasi dari beban di pabrik Amurea 2 hingga ke saluran menuju 20Bus86 20 kV. Dimulai dari rele 12, rele GI-15, rele GI-14, dan rele GI-04.



Gambar 3.4 Tipikal Koordinasi 2

- **Tipikal 3**

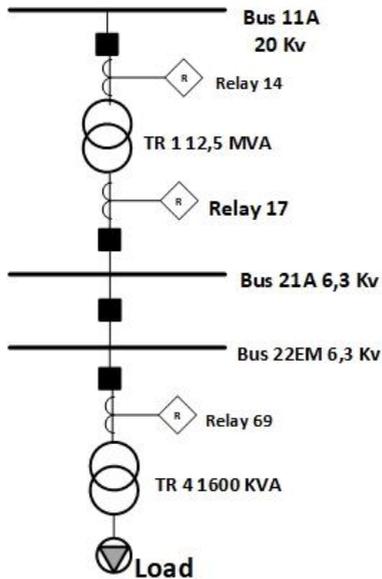
Tipikal 3 adalah koordinasi dari beban di pabrik Amurea 2 hingga ke saluran menuju Bus 29. Dimulai dari rele GI 02, sampai rele 37.



Gambar 3.5 Tipikal Koordinasi 3

- **Tipikal 4**

Tipikal 4 adalah koordinasi dari beban di pabrik Amurea 2 hingga ke saluran menuju Bus 11A 20Kv. Dimulai dari relay 14, relay 17, relay 69.



Gambar 3.6 Tipikal Koordinasi 4

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA

4.1 Analisa Busur Api

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya, pada tugas akhir ini akan menganalisa metode perhitungan busur api menggunakan kurva batasan energi dan kemudian dibandingkan dengan metode analisa perhitungan busur api menggunakan standart IEEE 1584-2002. Beberapa bus yang dianalisa antara lain :

- 11kV MVSWGR
- 20kV MVSWGR
- 20Kv BUS-11A
- 6,3Kv BUS-21B
- 6,3kv Bus 22EM
- 6,3 KV Bus 21A
- Bus 15
- Bus 164
- Bus 125

4.2 Perhitungan Busur Api Menggunakan Standart IEEE 1584-2002

Pada perhitungan busur api menggunakan standart IEEE 1584-2002, yang harus diketahui sebelumnya adalah data mengenai arus gangguan bolted pada tiap bus yang dianalisa. Dimana arus gangguan bolted merupakan arus hubung singkat tiga fasa, $\frac{1}{2}$ cycle saat pembangkitan maksimum [10]. Dimana pada arus gangguan bolted ini, arus kontribusi dari beban juga diperhitungkan. Setelah mendapatkan data arus gangguan bolted, makadata selanjutnya yang harus diketahui adalah data FCT pada setiap bus tersebut. FCT atau *fault clearing time* merupakan waktu yang diperlukan rele untuk mengamankan gangguan. Berdasarkan bus yang dianalisa, berikut ini merupakan tabel dari data arus gangguan bolted serta *fault clearing time* :

Tabel 4.1 Data arus gangguan bolted (Isc bolted) dan FCT

No.	ID BUS	Tegangan (kV)	Isc bolted (kA)	FCT (sec)
1	11kV MVSWGR	11	20,59	0,752
2	20 kv MVSWGR	20	23,09	0,572
3	20 kv Bus 11A	20	23,02	0,4
4	6,3 kv Bus 21B	6,3	16,11	0,4
5	6,3 KV Bus 22 EM	6,3	16	0,2
6	6,3 kv Bus 21A	6,3	16	0,2
7	Bus 15	11	20,59	0,4
8	Bus 164	20	22,91	2,025
9	Bus 125	20	22,88	0,22

Berdasarkan data tabel 4.1, maka dapat dicari arus arcing, energi normalisasi, insiden energi dan jarak kerja dengan menggunakan metode IEEE 1584-2002. Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2 dibawah ini :

Tabel 4.2 Hasil perhitungan busur api menggunakan standart IEEE 1584-2002

No.	ID BUS	Arus Arcing (kA)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori bahaya/resiko
1	11kV MVSWGR	19,74	26,163	4
2	20kv MVSWGR	23,12	161,683	>4
3	20 kv Bus 11A	23,02	112,785	>4
4	6,3 kv Bus 21B	15,5	10,722	3
5	6,3 KV Bus 22 EM	15,41	5,323	2
6	6,3 kv Bus 21A	15,4	5,323	2
7	Bus 15	19,74	13,916	3
8	Bus 164	22,88	42,603	>4
9	Bus 125	22,88	61,662	>4

Rincian perhitungan busur api menggunakan standart IEEE 1584-2002 dapat dilihat sebagai berikut :

- 11kV MVSWGR

Perhitungan arus arcng (I_a) :

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(20,59)$$

$$\log(I_A) = 1,2953, \quad I_A = 19,737 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,2953+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 10,316 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 10,316 \left(\frac{0,752}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 109,96 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 109,96 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 26,288 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

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

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 10,316 \left(\frac{0,752}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = [4,184 \times 10,316 \times 3,76 \times 102,6]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 21806,19 \text{ mm} = 82,86 \text{ ft}$$

- 6,3KV BUS 21B

Perhitungan arus arcng (I_a) :

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(16,11)$$

$$\log(I_A) = 1,190 \quad I_A = 15,50 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,190+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 7,93 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 7,93 \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 44,96 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 44,96 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 10,74 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

$$D_B = [4,184 \text{ Cf En} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 7,93 \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 8697,89 \text{ mm} = 33,05 \text{ ft}$$

- 6,3 KV BUS 22EM

Perhitungan arus arcing (Ia) :

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(16)$$

$$\log(I_A) = 1,187, \quad I_A = 15,38 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,1870+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 7,969 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \text{ Cf En} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 7,969 \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 22,59 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 22,59 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 5,399 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

$$D_B = [4,184 \text{ Cf En} \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 7,969 \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 4287,67 \text{ mm} = 16,29 \text{ ft}$$

- 6,3KV BUS 21A

Perhitungan arus arcing (Ia) :

$$\begin{aligned}\log(I_A) &= 0,00402 + 0,983 \log(I_B) \\ \log(I_A) &= 0,00402 + 0,983 \log(16) \\ \log(I_A) &= 1,187, \quad I_A = 15,38 \text{ kA}\end{aligned}$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\begin{aligned}E_n &= 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia)+ 0,0011 G} \\ E_n &= 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,1870+0,0011 \times 153} \\ E_n &= 7,969 \text{ J/cm}^2\end{aligned}$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 7,969 \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 22,59 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 22,59 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 5,399 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

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

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 7,969 \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 4287,67 \text{ mm} = 16,29 \text{ ft}$$

- Bus 15

Perhitungan arus arcng (Ia) :

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(20,59)$$

$$\log(I_A) = 1,295, \quad I_A = 19,73 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia)+ 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,2950+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 10,308 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 10,308 \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 58,44 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 58,44 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 13,96 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

$$D_B = [4,184 \text{ Cf En } \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 10,308 \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 11388,77 \text{ mm} = 43,27 \text{ ft}$$

- Bus 164

Perhitungan arus arcing (Ia) :

Karena tegangan bus lebih dari 15kV, maka perhitungan arus arcing menggunakan metode Lee :

$$I_a = I_b = 22,88$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_B \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 2,142 \times 10^6 \times 20 \times 22,88 \times \left(\frac{0,152}{910^2}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 179,91 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 179,91 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 43,00 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

$$D_B = [2,142 \times 10^6 \times V \times I_B \left(\frac{t}{E_B}\right)]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_B = [2,142 \times 10^6 \times 20 \times 22,88 \left(\frac{0,152}{5}\right)]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_B = 5458,70 \text{ mm} = 20,74 \text{ ft}$$

- 20KV BUS 11A

Perhitungan arus arcing (Ia) :

Karena tegangan bus lebih dari 15kV, maka perhitungan arus arcing menggunakan metode Lee :

$$I_a = I_b = 23,02$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_B \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 2,142 \times 10^6 \times 20 \times 23,02 \times \left(\frac{0,4}{910^2}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 476,35 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 476,35 / 4,184 \\ \text{Incident Energy} &= 113,85 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

$$\begin{aligned} D_B &= [2,142 \times 10^6 \times V \times I_B \left(\frac{t}{E_B}\right)^{\frac{1}{2}}] \\ D_B &= [2,142 \times 10^6 \times 20 \times 23,02 \left(\frac{0,4}{5}\right)^{\frac{1}{2}}] \\ D_B &= 8882,23 \text{ mm} = 33,75 \text{ ft} \end{aligned}$$

- 20KV MVSWGR

Perhitungan arus arcing (Ia) :

Karena tegangan bus lebih dari 15kV, maka perhitungan arus arcing menggunakan metode Lee :

$$I_a = I_{bf} = 23,09$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 2,142 \times 10^6 \times V \times I_B \left(\frac{t}{D^2}\right) \\ \text{Incident Energy} &= 2,142 \times 10^6 \times 20 \times 23,09 \times \left(\frac{0,572}{910^2}\right) \\ \text{Incident Energy} &= 683,26 \text{ J/cm}^2 \\ \text{Incident Energy} &= 683,26 / 4,184 \\ \text{Incident Energy} &= 163,30 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

$$\begin{aligned} D_B &= [2,142 \times 10^6 \times V \times I_B \left(\frac{t}{E_B}\right)^{\frac{1}{2}}] \\ D_B &= [2,142 \times 10^6 \times 20 \times 23,09 \left(\frac{0,572}{5}\right)^{\frac{1}{2}}] \\ D_B &= 10637,74 \text{ mm} = 40,42 \text{ ft} \end{aligned}$$

- 20KV BUS 125

Perhitungan arus arcing (Ia) :

Karena tegangan bus lebih dari 15kV, maka perhitungan arus arcing menggunakan metode Lee :

$$I_a = I_{bf} = 22,88$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_B \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 2,142 \times 10^6 \times 20 \times 22,88 \times \left(\frac{0,22}{910^2}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 260,40 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 260,40 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 62,23 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D) :

$$D_B = [2,142 \times 10^6 \times V \times I_B \left(\frac{t}{E_B}\right)]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_B = [2,142 \times 10^6 \times 20 \times 22,88 \left(\frac{0,22}{5}\right)]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_B = 6567,18 \text{ mm} = 24,95 \text{ ft}$$

4.3 Perhitungan Busur Api Menggunakan Metode Kurva Batasan Energi

Pada perhitungan busur api menggunakan metode kurva batasan energi ini, hal yang harus dilakukan pertama kali adalah mendapatkan kurva setiap kategori PPE. Dimana kurva ini menunjukkan hubungan arus – waktu, dan garis kurva ini didapatkan dari persamaan yang tetap mengacu pada IEEE 1584 – 2002.

Pada tiap bus yang dianalisa, terdapat 2 level tegangan yang diambil. Yaitu bus pada level tegangan 1 – 15 kV dan bus dengan tegangan lebih dari 15 kV.

4.3.1 Penentuan Kurva Batasan Energi Pada Level Tegangan 1-15 kV

Sesuai dengan standart IEEE 1584 – 2002, persamaan hubungan arus dan waktu untuk level tegangan 1 – 15 kV adalah sebagai berikut :

$$A_1 = 4,184 \frac{cf}{0,2} \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$A_2 = k_1 + k_2 + (0,0011xG)$$

$$A'^2 = 10^{A_2}$$

$$t = \frac{E}{A_1 A_2 I_a^{1.081}}$$

Dimana :

$$Cf = 1 \text{ (untuk tegangan diatas 1 kV)}$$

- D = 910 (jarak kerja dalam satuan mm)
 x = 0,973 (x faktor switchgear)
 k1 = -0,555 (peralatan tertutup)
 k2 = 0 (sistem tanpa grounding)
 G = 153 (gap antar bus untuk tegangan 5-15kV dalam satuan mm)

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 4,184 \frac{cf}{0,2} \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\
 &= 4,184 \frac{1}{0,2} \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right) \\
 &= 14,1755636 \\
 A_2 &= k1 + k2 + (0,0011xG) \\
 &= -0,555 + 0 + (0,0011x 153) \\
 &= -0,3876 \\
 A_2' &= 10^{A_2} \\
 &= 10^{-0,3876} \\
 &= 0,410488
 \end{aligned}$$

Berdasarkan tabel NFPA 70E-2015 untuk kategori 0 PPE nilai E adalah 5, 0208/cm² maka persamaannya,

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{E}{A_1 A^2 I a^{1,081}} \\
 t &= \frac{5,0208}{14,1755636 \times 0,410488 \times I a^{1,081}} \\
 t &= 0,8628 \times I a^{1,081}
 \end{aligned}$$

Untuk PPE kategori 1 nilai E = 16,736 J/cm² maka,

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{E}{A_1 A^2 I a^{1,081}} \\
 t &= \frac{16,736}{14,1755636 \times 0,410488 \times I a^{1,081}} \\
 t &= 2,8761 \times I a^{1,081}
 \end{aligned}$$

Untuk PPE kategori 2 nilai E = 33,47 J/cm² maka,

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{E}{A_1 A^2 I a^{1,081}} \\
 t &= \frac{33,47}{14,1755636 \times 0,410488 \times I a^{1,081}} \\
 t &= 5,7519 \times I a^{1,081}
 \end{aligned}$$

Untuk PPE kategori 3 nilai E = 104,6 J/cm² maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A^2 I a^{1,081}}$$

$$t = \frac{104,6}{14,1755636 \times 0,410488 \times I a^{1,081}}$$

$$t = 17,9759 \times I a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 4 nilai E = 167,36 J/cm² maka,

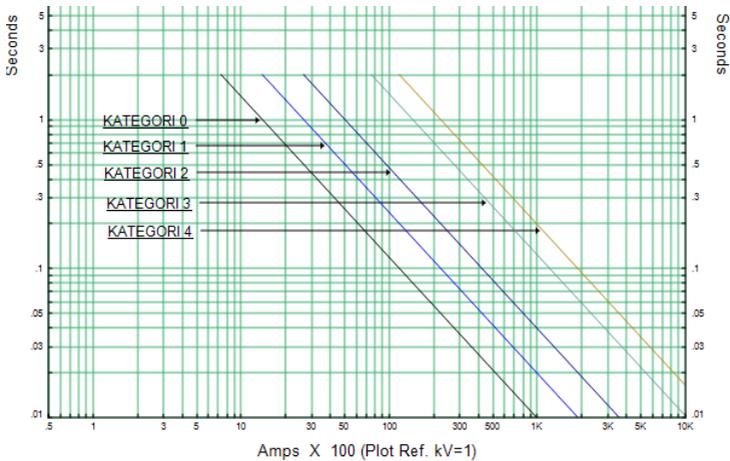
$$t = \frac{E}{A_1 A^2 I a^{1,081}}$$

$$t = \frac{167,36}{14,1755636 \times 0,410488 \times I a^{1,081}}$$

$$t = 28,7614 \times I a^{1,081}$$

Persamaan – persamaan diatas merupakan persamaan hubungan arus-waktu untuk setiap kategori PPE dengan standart insiden energi berdasarkan tabel NFPA 70E-2015. Dari setiap persamaan tersebut, diubah menjadi kurva garis. Hasil dari *plotting* kurva tersebut merupakan kurva batasan energi. Kurva tersebut nantinya dipotong pada waktu 2 detik. Dimana nilai waktu 2 detik ini berdasarkan ketentuan B.1.2 dari IEEE 1584. Ketentuan atau klausul B.1.2 IEEE 1584 menyatakan bahwa waktu 2 detik merupakan waktu yang “layak” atau “masuk akal” sebagai durasi maksimum untuk analisa busur api.

Analisa selanjutnya adalah dengan mensimulasikan kondisi 85% - 100% arus arcing dan durasi berlangsungnya sampai relay pengaman memutus gangguan (FCT). Adapun *plotting* kurva batasan energi untuk level tegangan 1-15 kV adalah sebagai berikut :



Gambar 4.1 kurva batas energi level tegangan 1-15 kV

4.3.2 Penentuan Kurva Batasan Energi Untuk Level Tegangan Lebih Dari 15 kV

Pada perhitungan busur api untuk level tegangan lebih dari 15kV, menggunakan persamaan Lee seperti berikut :

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

$$t = \frac{ED^2}{2,142 \times 10^6 V I_{bf}}$$

Dimana :

E = Insiden Energi tiap kategori PPE (J/cm^2)

D = 910 mm (Working distance)

V = 20 kV (Tegangan bus)

I_{bf} = Arus gangguan hubung singkat (kA)

t = waktu (s)

Untuk Kategori 0 PPE, Berdasarkan tabel NFPA 70E-2015 nilai E adalah $5,0208 J/cm^2$ maka persamaannya,

$$t = \frac{5,0208 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$

$$t = 0,0970 \times I_{bf}^{-1}$$

Untuk PPE kategori 1 nilai $E = 16,74 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{16,74 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$
$$t = 0.3236 \times I_{bf}^{-1}$$

Untuk PPE kategori 2 nilai $E = 33,47 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{33,47 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$
$$t = 0.6469 \times I_{bf}^{-1}$$

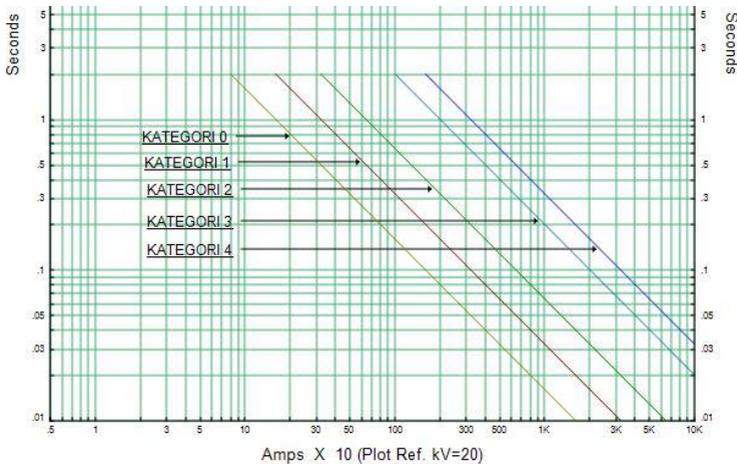
Untuk PPE kategori 3 nilai $E = 104,6 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{33,47 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$
$$t = 2,0219 \times I_{bf}^{-1}$$

Untuk PPE kategori 4 nilai $E = 167,36 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{167,36 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$
$$t = 3,2351 \times I_{bf}^{-1}$$

Dari setiap persamaan hubungan arus-waktu tersebut diubah kedalam kurva sebagai berikut :



Gambar 4.2 Kurva batasan energi pada level tegangan lebih dari 15kV

4.3.3 Perhitungan Jarak Aman Batas Perlindungan

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab 2, untuk menghitung jarak aman batas perlindungan menggunakan persamaan (2.18). Adapun nilai parameternya untuk sistem tegangan antara 1-15kV adalah sebagai berikut :

D_{WD} = Jarak pekerja 910 mm

E_{WD} = Nilai insiden energi pada tiap – tiap kategori PPE (J/cm^2)

X = Faktor switchgear nilainya 0,973

D_B = Jarak aman batas perlindungan (mm)

E_B = Nilai insiden energi pada level D_B yang mengakibatkan luka bakar derajat dua, Sesuai IEEE 1584-2002 nilainya adalah $5.0 J/cm^2$

Perhitungan jarak aman batas perlindungan PPE kategori 0, $E_{wd} = 5,0208 J/cm^2$:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5}{5,0208}}} = 913,89 \text{ mm} = 0,913 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 1, $E_{wd}=16,74 J/cm^2$:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5}{16,74}}} = 3150 \text{ mm} = 3,15 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 2, Ewd=33,47 J/cm²:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5}{33,47}}} = 6421 \text{ mm} = 6,42 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 3, Ewd=104,6 J/cm²:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5}{104,6}}} = 20713 \text{ mm} = 20,71 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 4, Ewd=167,36 J/cm²:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5}{167,36}}} = 33576 \text{ mm} = 33,57 \text{ meter}$$

Untuk jarak batas aman perlindungan pada sistem tegangan lebih dari 15 kV menggunakan persamaan (2.19) pada bab 2. Perhitungan jarak aman batas perlindungan PPE kategori 0, Ewd = 5,0208 J/cm²:

$$D_B = \frac{910}{2 \sqrt{\frac{5}{5,0208}}} = 911,8908 \text{ mm} = 0,9118 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 1, Ewd=16,74 J/cm²:

$$D_B = \frac{910}{2 \sqrt{\frac{5}{16,74}}} = 1665 \text{ mm} = 1,66 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 2, Ewd=33,47 J/cm²:

$$D_B = \frac{910}{2 \sqrt{\frac{5}{33,47}}} = 2354 \text{ mm} = 2,35 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 3, Ewd=104,6 J/cm²:

$$D_B = \frac{910}{2 \sqrt{\frac{5}{104,6}}} = 4162 \text{ mm} = 4,16 \text{ meter}$$

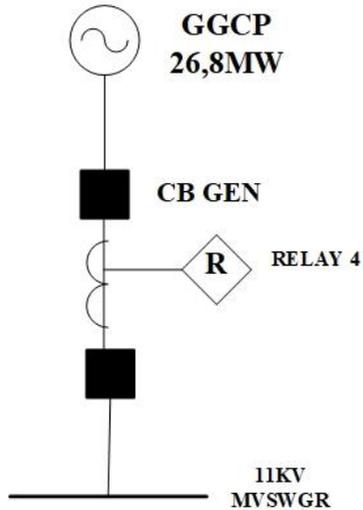
Untuk PPE kategori 4, Ewd=167,36 J/cm²:

$$D_B = \frac{910}{2 \sqrt{\frac{5}{167,36}}} = 5264 \text{ mm} = 5,26 \text{ meter}$$

4.3.4 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 11KV MVSWGR

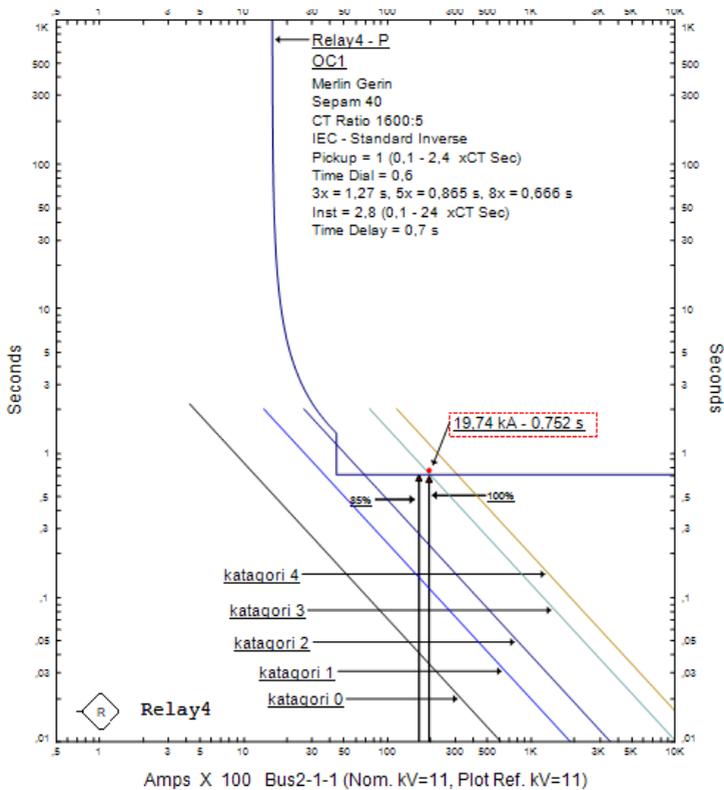
Pada bus 11KV MVSWGR, rele yang digunakan sebagai referensi kurva batasan energi adalah rele 4. Dimana rele ini yang

nantinya bertugas untuk mengatasi atau mengamankan gangguan yang muncul pada bus ini.



Gambar 4.3 Rele 4 sebagai pengaman bus 11KV MVSWGR

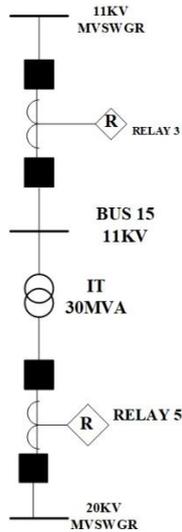
Analisa penentuan kategori PPE pada bus ini dapat dilihat pada gambar 4.4 berikut ini :



Gambar 4.4 Kurva rele 4 dengan kurva batasan energi pada level tegangan 1-15kV

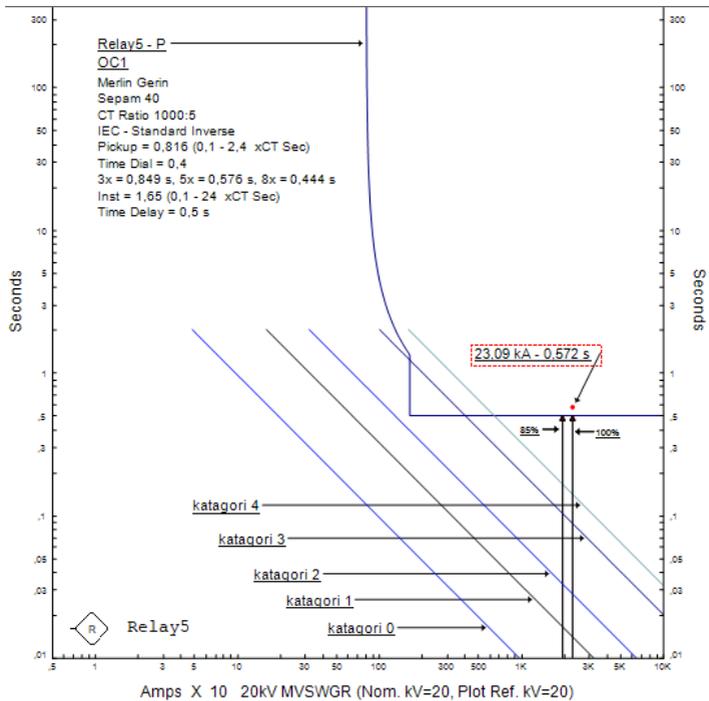
Pada bus 11KV MVSWGR, tegangan bus adalah sebesar 11 kV, sehingga untuk kurva batasan energinya menggunakan kurva batasan energi dengan rentang tegangan antara 1 hingga 15 kV. Pada hasil *plotting* kurva rele 4, terlihat bahwa sebagian kurva rele berada dibawah kurva batasan energi kategori 2. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1584 – 2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus arc. Nilai maksimum arus arc yang didapatkan adalah saat 100%, yaitu sebesar 19,74 kA dan terjadi selama 0,752 detik. Dimana titik tersebut berada dibawah kategori 4. Dan dapat disimpulkan pada bus 11KV MVSWGR harus menggunakan PPE kategori 4. Jarak maksimum aman untuk daerah tersebut adalah pada 21,711 meter

4.3.5 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 20KV MVSWGR



Gambar 4.5 Rele 5 sebagai pengaman bus 20KV MVSWGR

Pada bus 20KV MVSWGR ini, terdapat satu rele yang digunakan sebagai referensi kurva batasan energi. Rele tersebut adalah rele 5. Dimana bila terjadi gangguan, rele ini yang akan mengamankan gangguan tersebut.

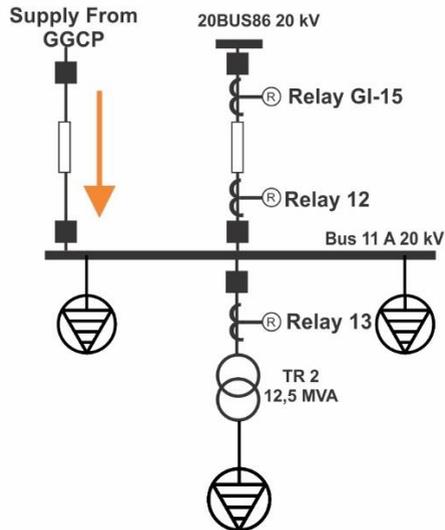


Gambar 4.6 Kurva rele 5 dengan kurva batasan energi untuk level tegangan lebih dari 15kV

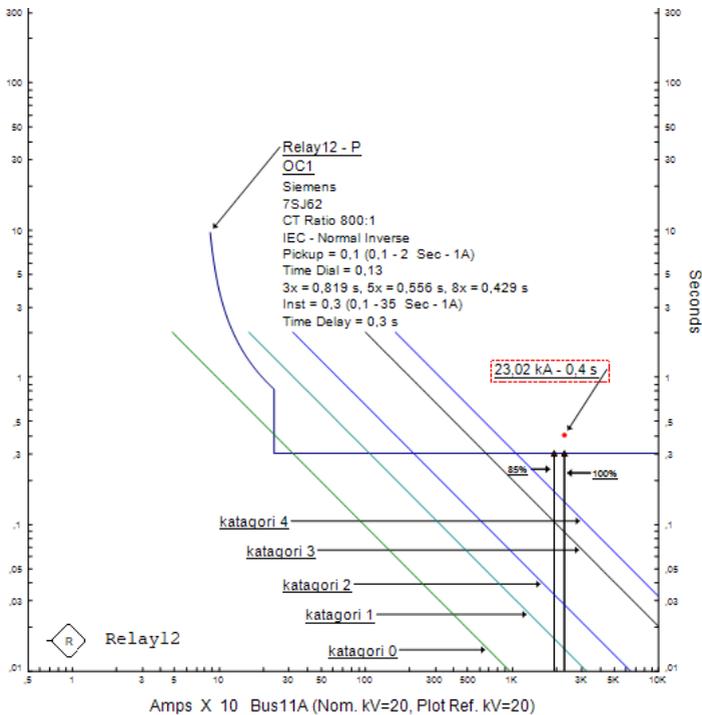
Pada bus 20 KV MVSWGR ini, tegangan bus adalah sebesar 20 kV, sehingga untuk kurva batasan energi yang digunakan adalah kurva batasan energi dengan rentang tegangan >15KV. Pada hasil plotting kurva rele 5, terlihat bahwa daerah rele berada diatas kurva kategori 2. Kemudian dilakukan pengecekan untuk nilai 85% - 100% arus arcng yang dihubungkan dengan FCT pada 20KV MVSWGR didapat 0,572 detik. Pada kondisi maksimal 100%, didapatkan arus arcng maksimal sebesar 23,09 kA. Hal ini menyebabkan titik tersebut melebihi kurva kategori 4. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kategori PPE untuk daerah ini melebihi kategori 4. Jarak aman untuk kategori itu adalah 10,634 meter.

4.3.6 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada 20KV Bus 11A

Pada bus 20KV Bus 11A ini terdapat 1 rele yang bertugas untuk mengamankan gangguan yang mungkin terjadi. Dimana rele tersebut adalah rele 11 .Rele ini juga dijadikan referensi untuk kurva batasan energi.

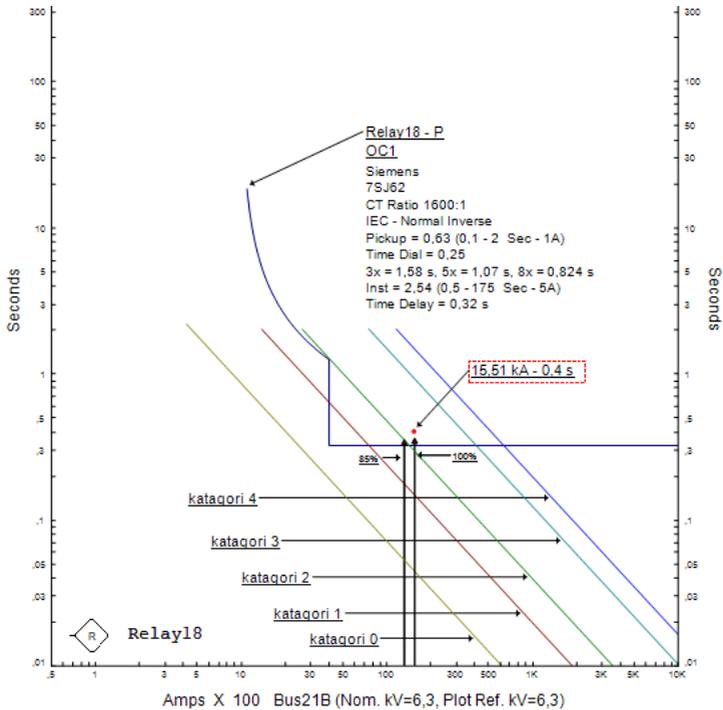


Gambar 4.7 Rele 12 sebagai rele pengaman bus 20kV BUS 11A



Gambar 4.8 Kurva rele 12 dengan kurva batasan energi untuk level tegangan lebih dari 15KV

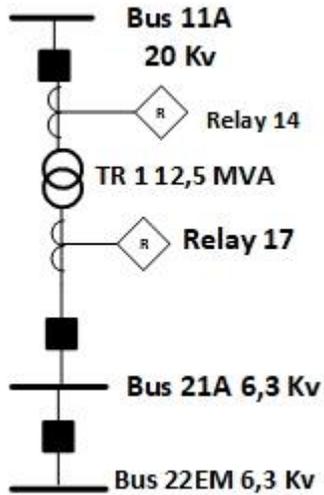
Pada BUS 11A ini, tegangan bus adalah sebesar 20 kV, sehingga kurva batasan energi yang digunakan adalah kurva batasan energi dengan rentang tegangan >15 kV. Pada hasil plotting kurva rele 12, terlihat bahwa sebagian kurva rele tersebut berada dibawah kurva kategori 0 dan sebagian berada diatas kategori 0. Kemudian dilakukan pengecekan untuk nilai 85% - 100% arus arcng yang dihubungkan dengan FCT pada bus didapat 0,4 detik. Kondisi maksimal didapat pada saat nilai arus arcng 100% sebesar 23,02 kA. Besarnya nilai FCT tersebut berdampak pada posisi titik berada melebihi kurva kategori 4. Sehingga, untuk daerah ini nilai PPE yang digunakan adalah lebih dari kategori 4. Jarak aman untuk daerah ini adalah 8,881 meter.



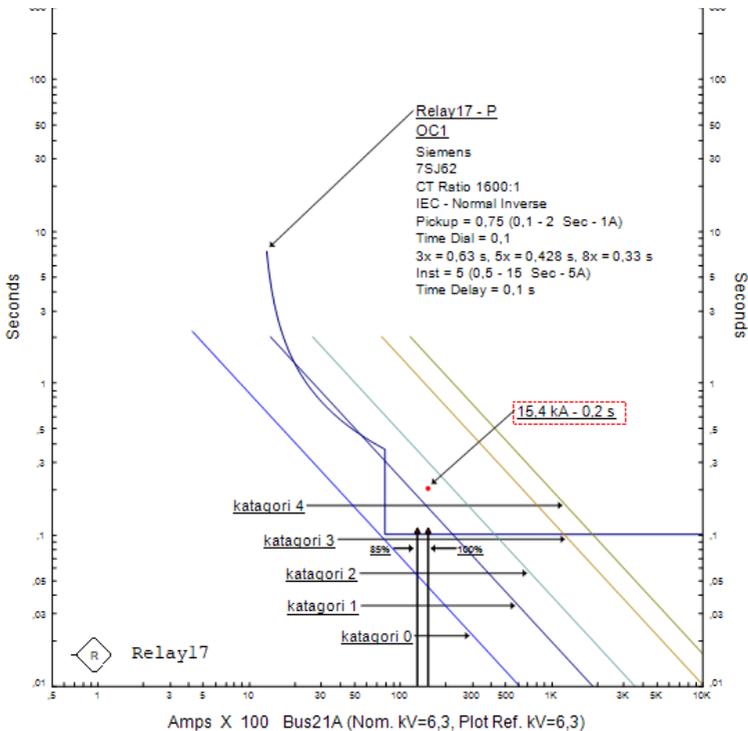
Gambat 4.10 Kurva rele 18 dengan kurva batasan energi 1-15kV

Pada bus 21b, tegangan bus adalah sebesar 6,3 kV, sehingga untuk kurva batasan energinya menggunakan kurva batasan energi dengan rentang tegangan antara 1 hingga 15 kV. Pada hasil *plotting* kurva rele 18, terlihat bahwa sebagian kurva rele berada dibawah kurva batasan energi kategori 1. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1584 – 2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus arcng. Nilai maksimum arus arcng yang didapatkan adalah saat 100%, yaitu sebesar 15,51 kA dan terjadi selama 0,4 detik. Dimana titik tersebut berada diatas kategori 2. Sehingga, PPE kategori 2 tidak cukup untuk daerah tersebut. Dan dapat disimpulkan pada bus 21b harus menggunakan PPE kategori 3. Jarak maksimum aman untuk daerah tersebut adalah pada 8,680 meter

4.3.8 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 6,3KV Bus 22EM



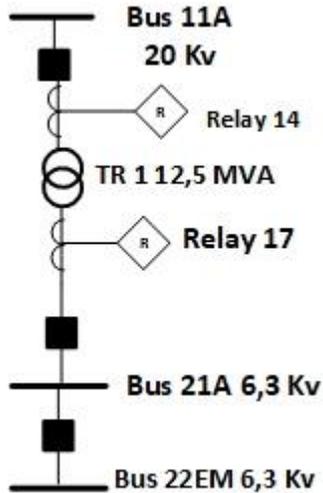
Gambar 4.11 Rele 17 sebagai rele pengaman utama pada bus 22EM



Gambar 4.12 Kurva rele 17 dengan kurva batasan energi 1-15kV

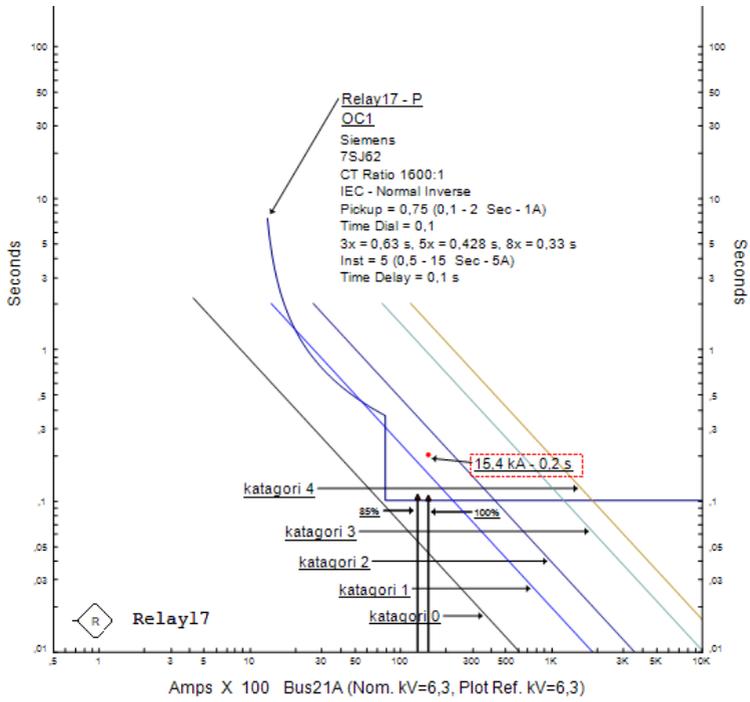
Pada bus 22EM, tegangan bus adalah sebesar 6,3 kV, sehingga pada bus ini, menggunakan kurva batasan energi dengan rentang antara 1 hingga 15 kV. Pada hasil *plotting* kurva rele 17, terlihat bahwa kurva rele sebagian besar berada diatas kurva batasan energi kategori 0. Kemudian sesuai dengan standart IEEE 1584 – 2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus arcng. Nilai arus arcng maksimal didapatkan pada saat 100% yaitu sebesar 15,4 kA. Dimana arus arcng tersebut berlangsung selama 0,2 detik sesuai dengan FCT bus 21EM. Titik tersebut berada diatas kurva kategori 1. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa nilai PPE pada bus 22EM adalah berada pada kategori 2. Dimana jarak aman untuk kategori tersebut adalah 4,226 meter.

4.3.9 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 6,3KV Bus 21A



Gambar 4.13 Rele 17 sebagai rele pengaman utama 6,3KV Bus 21A

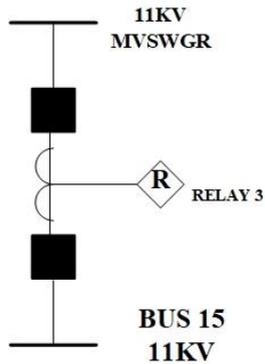
Pada bus 6,3KV Bus 21A ini terdapat 1 rele pengaman utama yang berfungsi untuk mengamankan gangguan yang terjadi. Kurva dari rele tersebut nantinya yang akan digunakan sebagai referensi untuk kurva batasan energinya.



Gambar 4.14 Kurva rele 17 dengan kurva batas energi 1-15 kV

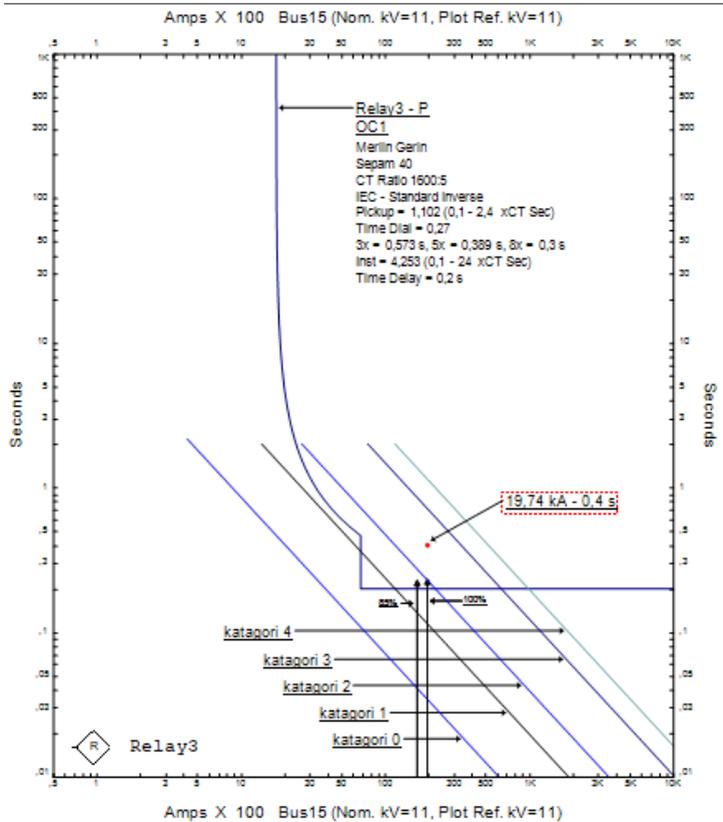
Pada BUS21A ini, tegangan bus adalah sebesar 6,3 kV, sehingga kurva batasan energi yang digunakan adalah kurva batasan energi dengan rentang tegangan antara 1 hingga 15 kV. Pada hasil plotting kurva rele 17 terlihat bahwa kurva rele sebagian berada dibawah kurva kategori 1. Kemudian dilakukan pengecekan untuk 85% - 100% arus arc yang dihubungkan dengan FCT bus didapat 0,2 detik. Kondisi maksimal arus arc didapat pada saat 100% dengan nilai arus arc adalah sebesar 15,4 kA. Dimana dari hasil pengecekan tersebut didapatkan titik yang berada melebihi dari kategori 1. Kategori PPE yang digunakan pada daerah ini adalah PPE kategori 2. Jarak aman untuk kategori ini adalah 4,226 meter.

4.3.10 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada Bus 15



Gambar 4.15 Rele 3 sebagai rele pengaman utama bus 15

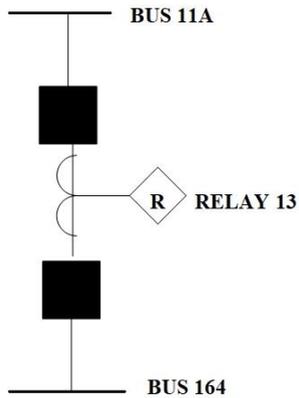
Pada bus 15 ini terdapat rele 3 yang berfungsi untuk mengamankan gangguan pada bus 15. Dimana kurva rele ini yang akan digunakan sebagai referensi kurva batasan energinya.



Gambar 4.16 Kurva rele 3 dengan kurva batas energi dengan level tegangan 1-15kV

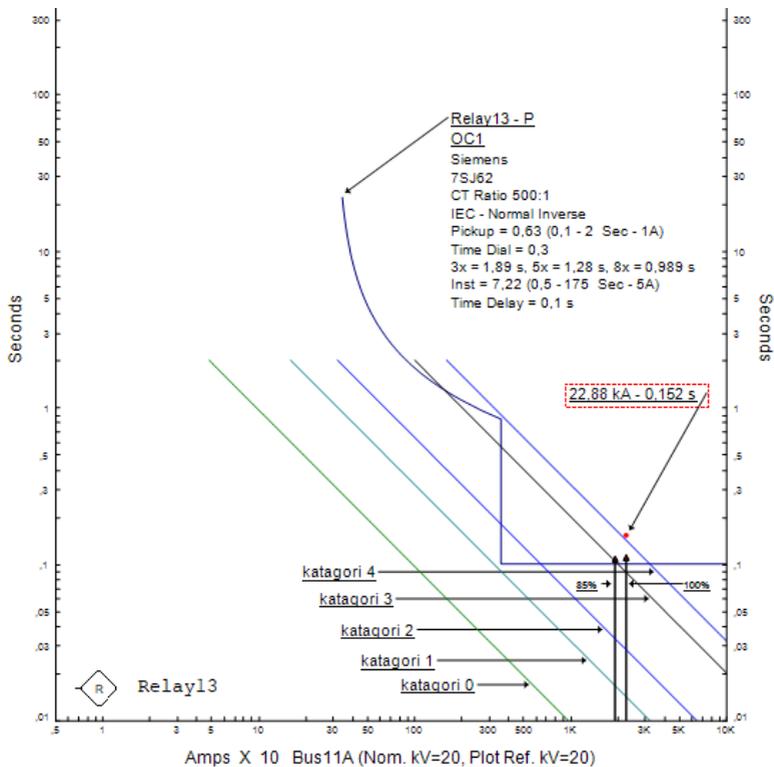
Pada bus 15 ini, tegangan bus adalah sebesar 11 kV. Pada *plotting* kurva rele 3, terlihat bahwa kurva rele berada diatas kurva kategori 2 dan. Kemudian, sesuai dengan standart IEE 1584 – 2002, dilakukan pengecekan untuk nilai arus arcing sebesar 85% hinggna 100%. Kondisi maksimal didapatkan saat arus arcing 100% sebesar 19,74 kA yang berlangsung selama 0,4 detik. Titik tersebut berada diatas kategori 2. Jarak aman untuk kategori ini adalah 11,348 meter.

4.3.11 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 164



Gambar 4.17 Rele 13 sebagai rele pengaman pada bus 164

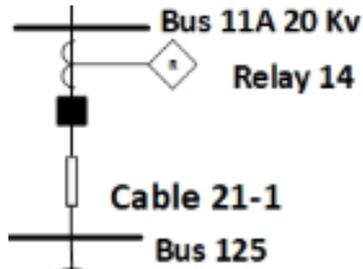
Pada bus 20KV Bus 164 ini terdapat rele 13 yang digunakan sebagai rele pengaman utama bila terjadi gangguan pada bus tersebut. Dimana bus 164 ini memiliki tegangan sebesar 20 kV , sehingga persamaan kurva batasan energi nya menggunakan metode Lee.



Gambar 4.18 Kurva rele 13 dengan kurva batasan energi untuk level tegangan lebih dari 15kV

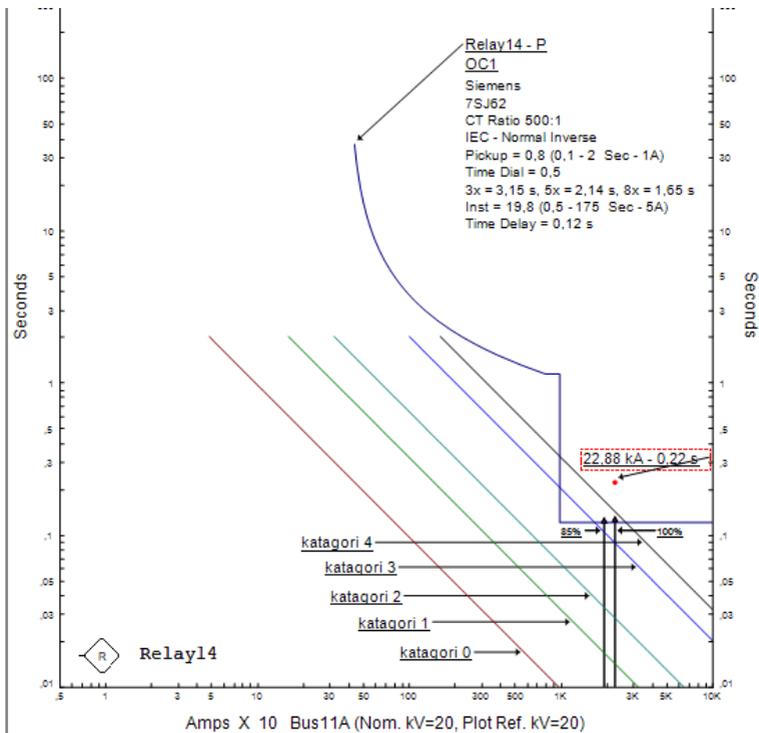
Pada bus 164 ini, tegangan bus adalah sebesar 20 kV. Sehingga, kurva batasan energi yang digunakan adalah kurva batasan energi diatas 15 kV. Pada plotting kurva rele 13, terlihat bahwa kurva rele berada dibawah kurva kategori 4. Kemudian dilakukan pengecekan untuk nilai 85% - 100% arus arcing didapatkan nilai arus sebesar 22,88 kA selama 0,152 detik. Kondisi ini didapatkan pada kondisi maksimal 100%. Sehingga, kategori PPE yang harus digunakan adalah PPE kategori >4 dengan jarak aman adalah 5,459 meter.

4.3.12 Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi pada bus 125



Gambar 4.19 Rele 14 sebagai rele pengaman pada bus 125

Pada bus 20KV Bus 125 ini terdapat rele 14 yang digunakan sebagai rele pengaman utama bila terjadi gangguan pada bus tersebut. Dimana bus 125 ini memiliki tegangan sebesar 20 kV , sehingga persamaan kurva batasan energinya menggunakan metode Lee.



Gambar 4.20 Kurva rele 14 dengan kurva batasan energi untuk level tegangan lebih dari 15kV

Pada bus 125 ini, tegangan bus adalah sebesar 20 kV. Sehingga, kurva batasan energi yang digunakan adalah kurva batasan energi diatas 15 kV. Pada plotting kurva rele 14, terlihat bahwa sebagian kurva rele berada diatas kurva kategori 3. Kemudian dilakukan pengecekan untuk nilai 85% - 100% arus arcing didapatkan nilai arus sebesar 22,88 kA selama 0,22 detik. Sehingga, kategori PPE yang harus digunakan adalah PPE kategori 3 dengan jarak aman adalah 6,567 meter.

4.4 Perbandingan Antara Perhitungan Menggunakan IEEE 1584 – 2002 dan Dengan Menggunakan Kurva Batas Energi.

Setelah dilakukan penghitungan mengenai kategori PPE antara metode IEEE 1584 – 2002 dan metode kurva batas energi, didapatkan hasil yang sama. Hasil perbandingan antara kedua metode tersebut dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.3 Perbandingan perhitungan menggunakan IEEE 1584-2002 dengan kurva batasan energi

No	ID BUS	Perhitungan metode IEEE 1584-2002		Metode Kurva Batas Energi	
		Kategori PPE	Jarak Aman (meter)	Kategori PPE	Jarak Aman Maksimal (meter)
1	11Kv MVSWGR	4	21,806	4	33,57
2	6,3kv bus 21B	3	8,697	3	20,71
3	6,3kvbus 22EM	2	4,287	2	6,42
4	6,3kv bus 21A	2	4,287	2	6,42
5	Bus 125	>4	6,567	>4	>5,26
6	20KVBUS 11A	>4	8,882	>4	>5,26
7	20kv MVSWGR	>4	10,637	>4	>5,26
8	Bus 164	>4	5,459	>4	>5,26
9	Bus 15	3	11,348	3	20,71

Tabel 4.4 Perbandingan perhitungan menggunakan Software dengan kurva batas energi

No	ID BUS	Perhitungan software		Metode Kurva Batas Energi	
		Kategori PPE	Jarak Aman (meter)	Kategori PPE	Jarak Aman Maksimal (meter)
1	11Kv MVSWGR	4	21,711	4	33,57
2	6,3kv bus 21B	3	8,680	3	20,71
3	6,3kvbus 22EM	2	4,226	2	6,42
4	6,3kv bus 21A	2	4,226	2	6,42

No	ID BUS	Perhitungan software		Metode Kurva Batas Energi	
		Kategori PPE	Jarak Aman (meter)	Kategori PPE	Jarak Aman Maksimal (meter)
5	Bus 125	>4	6,567	>4	>5,26
6	20KVBUS 11A	>4	8,881	>4	>5,26
7	20kv MVSWGR	>4	10,634	>4	>5,26
8	Bus 164	>4	5,459	>4	>5,26
9	Bus 15	3	11,348	3	20,71

Dari hasil perhitungan diatas, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan hasil jarak batas aman antara metode IEEE 1584-2002 dengan metode kurva batas energi. Ketika metode kurva batasan energi dilakukan, metode ini tidak menghitung secara tepat nilai insiden energinya. Namun, dari hasil kategori PPE yang diperoleh berdasarkan metode ini, maka dapat diambil nilai maksimum insiden energi berdasarkan hasil penentuan kategori PPE yang dilihat pada tabel NFPA 70E-2004 untuk pendekatan penentuan jarak batas aman.

Pada studi kasus bus dengan hasil analisa busur api menggunakan metode standart IEEE 1584-2002, dimana insiden energinya melebihi kategori 4, terdapat perbedaan penentuan jarak batas aman dengan metode kurva batasan energi yang cukup besar. Dimana hasil perhitungan menggunakan metode kurva batasan energi memberikan jarak yang lebih kecil daripada metode IEEE 1584-2002. Hal ini dikarenakan, untuk kategori PPE lebih dari 4, standart IEEE 1584-2002 dapat menghitung secara persis berapa nilai insiden energinya. Sehingga, nilai tersebut dapat digunakan sebagai parameter untuk penentuan jarak batas aman. Sedangkan pada metode kurva batasan energi, karena metode ini tidak menghitung nilai sebenarnya dari insiden energi yang terjadi, maka penentuan jarak batas aman untuk kategori PPE lebih dari 4 menggunakan jarak batas aman PPE kategori 4 dimana nilai tersebut dianggap yang paling maksimal berdasarkan tabel NFPA 70E-2004. Hal inilah yang menyebabkan nilai jarak batas aman untuk kategori PPE lebih dari 4 pada metode kurva batasan energi akan lebih kecil dibandingkan dengan jarak batas aman kategori PPE lebih dari 4 metode standart IEEE 1584-2002.

Dari penentuan kategori PPE yang telah ditentukan tadi, maka selanjutnya dapat ditentukan pula standart PPE yang harus digunakan sesuai dengan NFPA-70E seperti tabel berikut :

Tabel 4.5 Standart NFPA-70E 2015 berdasarkan kategori PPE masing – masing bus

No.	ID BUS	Kategori PPE	PPE
1	11KV MVSWGR	4	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika di perlukan)
2	6,3KV Bus 21B	3	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika di perlukan)
3	6,3KV Bus 22EM	2	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sarung tangan kulit yang tebal - sepatu kulit
4	6,3KV Bus 21A	2	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka

No.	ID BUS	Kategori PPE	PPE
			<ul style="list-style-type: none"> - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sarung tangan kulit yang tebal - sepatu kulit
5	Bus 125	>4	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika diperlukan)
6	Bus 164	>4	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika diperlukan)
7	20KV Bus 11A	>4	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika diperlukan)
8	20KV MVSWGR	>4	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka

No.	ID BUS	Kategori PPE	PPE
			<ul style="list-style-type: none"> - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika di perlukan)
9	20KV Bus 15	3	<ul style="list-style-type: none"> - Helm full face / topi yang keras untuk pelindung kepala dan muka - kacamata / penutup wajah untuk pelindung mata - Pelindung pendengaran dengan alat bantu dengar - sepatu kulit (jika di perlukan)

Tabel 4.6 Perbandingan metode IEE 1584-2002 dengan Kurva batas energi

Keterangan	Std IEE 1584-2002	Kurva Batas Energi
Langkah Perhitungan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mengumpulkan data system 2. Menghitung besarnya arus bolted 3. Menghitung besarnya arus arcing 4. Menghitung besarnya insiden energi 5. Menentukan PPE yang sesuai 6. Menghitung jarak aman pekerja 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mengumpulkan data system 2. Menentukan relay pengaman utama 3. Menentukan kategori PPE dan jarak aman pekerja
Kategori PPE	Kategori 4	Kategori 4
Jarak aman perlindungan	21,806	33,57

Tabel 4.7 Hasil simulasi Arc Flash sebelum menggunakan relay diferensial

No.	ID BUS	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori bahaya/resiko
1	11kV MVSWGR	19,74	0,752	26,163	4
2	20kv MVSWGR	23,12	0,572	161,683	>4
3	20 kv Bus 11A	23,02	0,4	112,785	>4
4	6,3 kv Bus 21B	15,5	0,4	10,722	3
5	6,3 KV Bus 22 EM	15,41	0,2	5,323	2
6	6,3 kv Bus 21A	15,4	0,2	5,323	2
7	Bus 15	19,74	0,4	13,916	3
8	Bus 164	22,88	2,025	42,603	>4
9	Bus 125	22,88	0,22	61,662	>4

Tabel 4.8 Hasil simulasi Arc Flash setelah menggunakan relay diferensial

No.	ID BUS	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori bahaya/resiko
1	11kV MVSWGR	19,74	0,752	26,163	4
2	20kv MVSWGR	23,09	0,116	32,814	4
3	20 kv Bus 11A	23,02	0,119	33,621	4
4	6,3 kv Bus 21B	15,51	0,071	1,910	1
5	6,3 KV Bus 22 EM	15,4	0,119	3,174	1
6	6,3 kv Bus 21A	15,4	0,119	3,174	1
7	Bus 15	19,74	0,252	8,767	3
8	Bus 164	22,88	0,068	19,059	3
9	Bus 125	22,88	0,116	32,513	4

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil yang didapatkan berdasarkan simulasi, perhitungan, serta analisa, maka pada tugas akhir ini dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu :

1. Penentuan kategori PPE antara metode kurva batas energi dengan metode standart IEEE 1584-2002 menunjukkan hasil yang sama.
2. Adanya perbedaan pada hasil perhitungan batas jarak aman antara metode kurva batas energi dengan standart IEEE 1584-2002. Hal ini disebabkan karena pada metode kurva batasan energi, tidak memperhitungkan nilai insiden energi serta fault clearing time pada masing – masing bus.
3. Analisa busur api untuk penentuan kategori PPE menggunakan kurva batasan energi ini sesuai dilakukan pada sistem kelistrikan dengan memiliki banyak bus. Karena, metode ini cukup memasukkan karakteristik kurva pengaman pada kurva batasan energi. Sehingga pada perpotongan kedua kurva tersebut dapat ditentukan kategori PPE yang diperlukan.

5.2 Saran

Dari tugas akhir berikut saran yang dapat digunakan sebagai referensi untuk PT. Petrokimia Gresik kedepannya :

1. Pada beberapa bus yang dianalisa, masih terdapat insiden energi yang melebihi kategori 4. Sehingga, hal tersebut masih berbahaya. Hal yang dapat dilakukan adalah dengan mempercepat fault clearing time pada bus tersebut atau dengan menambahkan rele diferensial untuk mengurangi nilai insiden energinya.

2. Untuk bus dengan kategori PPE lebih dari 4, akan menyebabkan jarak batas aman menggunakan metode kurva batasan energi lebih kecil dibandingkan dengan metode IEEE 1584-2002. Sehingga, akan lebih baik jika pada bus tersebut nilai insiden energi yang didapatkan dikurangi agar tidak lebih dari kategori 4. Hal ini bertujuan untuk memberikan jarak batas aman yang sesuai dengan kategori yang seharusnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Std. 1584-2002. “*Guide for Performing Arc flash Hazard Calculations*”.
- [2] Timothy B. Dugan, “*Reducing The Arc flash Hazard*,”*IEEE Industry Application Magazine.*, May-June 2007
- [3] Yasser Moustafa Atwa , “*Mitigating Arc-Flash Exposure*,” *IEEE Industry Application Magazine.*, July-August 2011.
- [4] Analisa Sistem Proteksi dengan Metode Perhitungan *Arc-Flash* yang Dimodifikasi untuk Diaplikasikan pada Sistem Tegangan Menengah di PT. Pupuk Kaltim Unit I (PKT I)
- [5] Simplified Arc-Flash Hazard Analysis Using Energy Boundary Curves (paper IEEE)
- [6] *Standard for Electrical Safety in the Workplace*, NFPA 70E, 2015

Halaman ini sengaja dikosongkan



BIOGRAFI

Penulis bernama lengkap Alief Nur Aisyi Maulidhia. Lahir pada 28 Juli 1997 dan besar di Surabaya. Mengenyam pendidikan sekolah dasar selama 6 tahun dari 2003 hingga 2009 di SD Muhammadiyah 4. Kemudian melanjutkan ke jenjang sekolah menengah pertama pada 2009 hingga 2012 di SMPN 19 Surabaya. Periode 2012 – 2015, penulis melanjutkan pendidikan sekolah atas di SMAN 1 Surabaya. Kemudian pendidikan tinggi dilanjutkan di Teknik Elektro ITS dari 2015 hingga 2018. Penulis dapat dihubungi melalui email di aliefnuram280797@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan