

# Analisa Sistem Proteksi dengan Metode Perhitungan *Arc-Flash* yang Dimodifikasi untuk Diaplikasikan pada Sistem Tegangan Menengah di PT. Pupuk Kaltim Unit I (PKT I)

Rahmat Riyadi, Rony Seto Wibowo, Margo Pujiantara.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

margo@ee.its.ac.id

**Abstrak**— Berdasarkan standar IEEE 1584-2002 yang mengatur tentang analisa bahaya busur api (*arc-flash*) pada sistem tegangan rendah dan menengah, pengguna dapat dengan mudah menentukan batas keamanan untuk para pekerja. Namun, perlu diperhatikan bahwa standar yang ada diperoleh dari hasil pengukuran insiden energi busur api pada kondisi tertentu dan dikombinasikan dengan teori. Menurut rekomendasi standar IEEE, perhitungan arus hubung singkat selalu memperhatikan kontribusi arus gangguan dari generator, motor induksi dan sinkron. Besar kecilnya energi *arc-flash* dapat ditentukan dari beberapa sudut pandang. Diantaranya ialah nilai energi *arc-flash* akan besar apabila dihitung dengan menggunakan arus *bolted three-phase fault*, sedangkan dari sudut pandang *arc-clearing time* yang didapat dari waktu dimana arus gangguan saat itu terjadi akan menghasilkan nilai energi busur api yang lebih rendah. Hal ini memunculkan metode perhitungan modifikasi yang didasarkan pada perhitungan kontribusi arus hubung singkat dan waktu pemadaman busur api (*arc-clearing time*) sehingga besar energi busur api yang dihasilkan lebih rendah dari perhitungan standar IEEE 1584-2002. Hal tersebut dapat dijadikan sebagai acuan untuk perbaikan sistem pengamanan.

**Kata Kunci**— *Arc-clearing time*, *Bolted three-phase fault* dan *Modifikasi Perhitungan*.

## I. PENDAHULUAN

PT. Pupuk Kalimantan Timur (PKT) atau biasa disebut Pupuk Kaltim merupakan perusahaan yang bergerak dibidang industri pupuk terutama pupuk urea, yang memiliki beberapa cabang pabrik yang memproduksi amonia. Salah satu pabrik yang memproduksi amonia adalah pabrik Kaltim I, gas amonia yang diproduksi pabrik tersebut merupakan salah satu unsur bahan penyusun pupuk urea. Seperti yang telah diketahui bahwa selain menimbulkan bau yang tidak sedap, gas amonia juga merupakan salah satu unsur gas yang mudah terbakar (*flameable*). Berdasarkan fakta tersebut sistem keamanan dan keselamatan pekerja di sekitar pabrik Kaltim I haruslah lebih diperhatikan daripada unit pabrik lainnya. Hal ini dikarenakan resiko apabila terjadi gangguan teknis maupun non-teknis yang dapat memicu percikan api maka akan berakibat fatal. Hingga kemungkinan paling buruk ialah terbakarnya pabrik dan mengancam keselamatan jiwa para pekerja disekitarnya.

Salah satu gangguan yang dapat menyebabkan ancaman terhadap keselamatan jiwa para pekerja ialah akibat busur api

(*arc-flash*). Busur api merupakan fenomena percikan api yang timbul akibat adanya arus gangguan hubung singkat. Seiring dengan bertambahnya jumlah unit produksi maka hal tersebut juga memperbesar gangguan elektrik yang mungkin terjadi akibat gangguan arus hubung singkat.

Besar energi busur api yang dihasilkan tergantung dari waktu kerja sistem pengamanan akibat gangguan arus hubung singkat. Semakin cepat rele pengamanan 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.

## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Busur Api Listrik (*Arc-flash*)

Awal mula *arc flash* muncul diakibatkan dari adanya *arcing fault*. *Arcing fault* sendiri dapat didefinisikan sebagai aliran arus listrik yang mengalir pada saluran yang seharusnya tidak teraliri arus (*arcing fault current*). Arus tersebut menciptakan sebuah plasma busur listrik dan melepaskan sejumlah energi yang berbahaya. Busur api listrik merupakan bagian dari arus listrik yang besar melalui udara yang terionisasi [3].

*Arc flash* diakibatkan dari *arcing fault* diantara fase bus-bar atau dengan netral (*ground*). Selama *arc fault* terjadi udara merupakan konduktor dan biasanya muncul pada tegangan lebih dari 120 volt. Besar *arcing fault current* biasanya lebih rendah dari besar arus *bolted fault* dan di bawah *rating circuit breaker* [4].

Plasma energi yang dihasilkan dapat menimbulkan beberapa efek fisik antara lain berupa ledakan bola api yang terhempas ke luar, panas yang dihasilkan dapat menyebabkan luka bakar yang parah, cahaya yang menyilaukan, gelombang bertekanan yang dihasilkan seolah-olah seperti martil menghantam bagian dada dari tubuh hingga dapat menghempaskan orang disekitarnya, suara ledakan yang dapat mengganggu pendengaran dan tetesan logam cair akibat konduktor yang meleleh berterbangan ke segala arah seperti pecahan peluru. *Bolted-fault current* dapat disebabkan beberapa faktor diantaranya kegagalan mekanik, kegagalan

isolasi, debu dan korosi atau kesalahan pekerja yang bekerja pada peralatan bertegangan [5].

Jumlah energi yang dihasilkan *arc flash* tergantung dari level tegangan tempat arus gangguan terjadi, jarak pekerja dengan sumber arcing dan waktu yang dibutuhkan peralatan pengaman arus lebih untuk menghilangkan dan mengisolir gangguan.

### B. Perhitungan Energi Arc-Flash Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 [1]

*Arcing fault current* ( $I_a$ ) :

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (1)$$

dimana,

$\lg = \log_{10}$

$I_a$  = arus busur api / *arcing current* (kA)

$I_{bf}$  = *bolted three-phase fault at the bus symmetrical rms* (kA)

Dari persamaan (1) dapat ditulis kembali dengan persamaan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \lg I_a - 0,983 \lg I_{bf} &= 0,00402 \\ \lg I_a - \lg I_{bf}^{0,983} &= 0,00402 \\ \lg (I_a / I_{bf}^{0,983}) &= 0,00402 \\ I_a / I_{bf}^{0,983} &= 10^{0,00402} \\ I_a / I_{bf}^{0,983} &= 1,00929 \\ I_a &= 1,01 \times I_{bf}^{0,983} \end{aligned} \quad (2)$$

Energi *arc-flash* ( $J^{joule/cm^2}$ ):

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011G$$

atau bisa dituliskan dengan persamaan berikut,

$$E_n = I_a^{1,081} \times 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011G)} \quad (3)$$

Dengan adanya variabel waktu, x faktor dan jarak antara peralatan dengan pekerja maka akan menghasilkan jumlah energi yang dilepaskan ke udara. Besarnya dapat dituliskan dalam persamaan berikut dalam satuan  $cal/cm^2$ .

$$E = C_f \times E_n \times (t/0,2)(610/D)^x \quad (4)$$

Substitusi  $E_n$  dari persamaan (3) ke (4),

$$\begin{aligned} E &= C_f \times (I_a^{1,081} \times 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011G)}) \times (t/0,2) \times (610/D)^x \\ &= C_f \times 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011G)} (610/D)^x \times I_a^{1,081} (t/0,2) \end{aligned} \quad (5)$$

Dimana,

- $E_n$  = Insiden energi normal tanpa pengaruh waktu dan jarak ( $J^{joule/cm^2}$ ).
- $K_1$  = -0,792 untuk konfigurasi terbuka dan -0,555 untuk konfigurasi tertutup atau *box*.
- $K_2$  = 0 untuk sistem *ungrounded or high-resistance* dan -0,113 untuk sistem *grounded*.
- $G$  = gap antara konduktor (mm)
- $E$  = Insiden energi ( $cal/cm^2$ )
- $C_f$  = 1,0 untuk tegangan lebih dari 1 kV dan 1,5 untuk tegangan kurang dari 1 kV
- $t$  = *arcing time* (sec) pada alat proteksi di atas bus

$D$  = jarak batas pekerja dari sumber *arcing* (mm)

$x$  = eksponen jarak

$I_{bf}$  = *bolted three-phase fault at the bus symmetrical rms* (kA)

### C. Perhitungan Insiden Energi Arc-Flash dengan Metode Modifikasi [2]

Pada metode modifikasi kali ini terdapat sedikit perbedaan dengan standar yaitu dengan cara mensubstitusikan persamaan energi busur api dengan data real. Dengan demikian memunculkan konstanta baru yang besarnya tergantung dengan data sistem yang telah ada. Selain itu, terdapat pengelompokkan waktu (*time domain*) untuk mengetahui lamanya selang waktu kontribusi arus hubung singkat yang diberikan serta memperhatikan waktu bekerjanya rele pengaman.

F1-2 Breaker = 0,41s

F2-3 Breaker = 0,71s

K1-BKR-22 = 0,61s

INC BSG = 0,91s

F4-2 = 0,91s

CB 367 = 0,91s

#### Time Domain

0-0,035s

Utility @  $X_s$

Generator @  $X_d''$

Synchronous motors and induction motors (> 1000 hp) @  $X_d''$  or  $X_{lr}$

Induction motors (> 250 hp) @ 1,2  $X_{lr}$

Induction motors (50–200 hp) @ 1,2  $X_{lr}$

Induction motors (< 50 hp) @ 1,67  $X_{lr}$

0,035-0,067s

Utility @  $X_s$

Generator @  $X_d'$

Synchronous motors and induction motors (> 1000 HP) @ 1,5  $X_d''$  or  $X_{lr}$

Induction motors (> 250 hp) @ 3,0  $X_{lr}$

Induction motors (50–200 hp) @ 3,0  $X_{lr}$

0,067-0,8s

Utility @  $X_s$

Generator @  $X_d'$

Synchronous motors and induction motors (> 1000 hp) @ 1,5  $X_d''$  or  $X_{lr}$

0,80-0,83s

Utility @  $X_s$

Generator @  $3 \times FLA$  (based on "field forcing")

0,83-t s

Generator @  $3 \times IFLA$  (based on "field forcing")

Tegangan 6,6 kV untuk *switchgear ungrounded system* pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kaltim I (*existing*).

$C_f = 1,0$ ;  $K_1 = -0,555$ ;  $K_2 = 0$ ;  $G = 1$  mm;  $x = 0,973$ ;

$D = 457,2$  mm

Dari data di atas dapat dituliskan dengan,

$$E = 1 \times 10^{(-0,555 + 0 + 0,0011 \cdot 1)} \times (610/457,2)^{0,973} \times I_a^{1,081} (t/0,2)$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 \times 10^{-0,5539} \times 1,324 \times I_a^{1,081} \times t/0,2 \\
 &= 1 \times 0,279 \times 1,324 \times I_a^{1,081} \times t/0,2 \\
 &= 0,369 \times I_a^{1,081} \times t/0,2
 \end{aligned}$$

$$E = 1,845 \times I_a^{1,081} \times t \text{ atau } E = 1,863 \times I_{bf}^{1,063} \times t \quad (6)$$

Tegangan 6,6 kV untuk *switchgear ungrounded system* pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kaltim I (IEEE 1584-2002).

Cf = 1,0; K1 = -0,555; K2 = 0 ; G = 153 mm; x = 0,973;

D = 914,4 mm

Dari data di atas dapat dituliskan dengan,

$$\begin{aligned}
 E &= 1 \times 10^{(-0,555 + 0 + 0,0011 \cdot 153)} \times (610/914,4)^{0,973} \times I_a^{1,081}(t/0,2) \\
 &= 1 \times 10^{-0,3867} \times 0,674 \times I_a^{1,081} \times t/0,2 \\
 &= 1 \times 0,410 \times 0,674 \times I_a^{1,081} \times t/0,2 \\
 &= 0,276 \times I_a^{1,081} \times t/0,2
 \end{aligned}$$

$$E = 1,38 \times I_a^{1,081} \times t \text{ atau } E = 1,394 \times I_{bf}^{1,063} \times t \quad (7)$$

**D. Pengelompokan Kategori Energi Busur Api dengan Perlengkapan Keselamatan Diri Sesuai Standar NFPA 70E-2003**

Setelah dilakukan perhitungan energi busur api yang dihasilkan pada tiap-tiap bus *switchgear*. Langkah selanjutnya adalah mengkategorikan perlengkapan keselamatan yang harus digunakan bagi siapa saja yang masuk ke area tersebut (*workers*). Kategori ini didasari atas besarnya energi yang dihasilkan serta dampak yang ditimbulkan bagi tubuh manusia. Pemilihan perlengkapan perlindungan diri yang tepat memberikan kenyamanan para pekerja agar dapat bekerja dengan efektif. Pengelompokan kategori dapat dilihat pada Tabel 1.

**E. Flash Protection Boundary [5]**

Pendekatan batas jarak dari bagian konduktor aktif dimana orang pada jarak tersebut dapat terpapar luka bakar tingkat dua jika ledakan busur api listrik terjadi. Jarak tersebut dapat diketahui apabila besar energi busur api listrik tersebut telah terhitung.

Gambar 1. merupakan jarak batas dimana seseorang tanpa memakai alat pelindung yang memadai (*Personal Protective Equipment/PPE*) dapat terkena luka bakar tingkat dua yang sulit disembuhkan akibat ledakan busur api. Metode perhitungan jarak tersebut dijelaskan menurut persamaan IEEE 1584-2002 berikut.

$$D_B = [ 4,184 \times C_f \times E_n \times (t/0,2)(610^x/E_B) ]^{1/x} \quad (8)$$

Dimana,

$D_B$  = batas jarak dari titik *arcing* (mm)

$C_f$  = faktor pengali

1,0 untuk tegangan di atas 1 kV

1,5 untuk tegangan di bawah 1 kV

$E_n$  = incident energy normalized

$E_B$  = incident energy in  $J/cm^2$  at the boundary distance can be set at  $5,0 J/cm^2$  for bare skin (no hood)

t = waktu (detik)

x = eksponen jarak

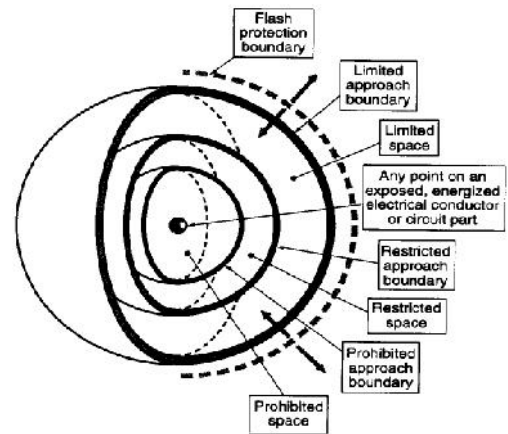
**III. PETUNJUK TAMBAHAN**

**A. Sistem Kelistrikan PT. PKT Bontang, Pabrik Kaltim I**

PT. Pupuk Kaltim I ialah salah satu bagian dari PT. Pupuk Kaltim (Bontang) sebagai penghasil gas amonia. *Supply* daya untuk melayani beban pada pabrik Kaltim I mengandalkan sistem utama yaitu sistem *ring* 33 kV yang disalurkan menjadi

Tabel 1.  
Kategori Perlengkapan Pelindung Diri  
(*Personal Protective Equipment/PPE*) [7]

Category	Cal/cm <sup>2</sup>	Clothing
0	1,2	Untreated Cotton
1	4	Flame retardant (FR) shirt and FR pants
2	8	Cotton underwear FR shirt and FR pants
3	25	Cotton underwear FR shirt, FR pants and FR coveralls
4	40	Cotton underwear FR shirt, FR pants and double layer switching coat and pants



Gambar 1. Ilustrasi Batas Aman dari Konduktor Bertegangan

dua buah *switchgear* masing-masing pada bus 1501-1 dan bus 1501-3. Guna memenuhi beban dan jumlah permintaan pasar akan pupuk yang terus meningkat dari waktu ke waktu. Maka pabrik Kaltim I melakukan penambahan *supply* daya dengan menambah unit pembangkit tenaga uap. Masing-masing pada Kaltim 1A dengan tambahan unit pembangkit berkapasitas 16 MW sedangkan pada Kaltim 1B dengan unit pembangkit berkapasitas 11 MW.

**B. Perhitungan Besar Insiden Busur Api Berdasarkan Setting Waktu Rele Pengaman**

Erat kaitannya antara lama durasi bekerjanya suatu peralatan pengaman dengan besarnya insiden busur api yang terjadi. Waktu begitu sangat penting peranannya dengan akibat besar energi busur api yang dihasilkan. Semakin lama rele pengaman merasakan gangguan dan mengisolir gangguan dari sistem maka akan semakin besar pula besar insiden energi busur api yang dihasilkan pada bus *switchgear/MCC*. Hal ini dikarenakan rele pengaman terlalu lama untuk *trip* sehingga memungkinkan arus gangguan hubung singkat tetap mengalir.

Untuk memudahkan *setting* waktu rele pengaman PT. Pupuk Kaltim I maka dibagi menjadi dua area sistem yaitu

sistem Kaltim 1A dan Kaltim 1B. Masing-masing area dipisah kembali menjadi beberapa *typical setting* rele. Kaltim 1A dibagi menjadi *typical 1A\_1* dan Kaltim 1B dibagi menjadi *typical 1B\_1* dan *typical 1B\_2*.

Tabel 2.  
Kategori Besar Insiden Energi (*Existing*)

ID BUS	Insiden Energi ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )	Kategori
1501-1	43,83	<i>Exceeds</i>
1501-2	43,83	<i>Exceeds</i>
1501-3	47,69	<i>Exceeds</i>
1501-4	47,69	<i>Exceeds</i>
3501-1	58,43	<i>Exceeds</i>
15-1	47,69	<i>Exceeds</i>

Tabel 3.  
Hasil Energi Busur Api Akibat Standarisasi

ID BUS	Gap (mm)	Distance (mm)	Insiden Energi ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )	Kategori
1501-1	153	914,4	32,81	4
1501-2	153	914,4	32,81	4
1501-3	153	914,4	35,71	4
1501-4	153	914,4	35,71	4
3501-1	153	914,4	21,47	3
15-1	153	914,4	35,71	4

#### IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA

##### A. Simulasi Besar Insiden Energi Arc-Flash Existing

Besar energi busur api yang dianalisa hanya pada tiap-tiap bus tegangan menengah (6.6 kV). Hasil simulasi yang didapatkan diperoleh dari perhitungan yang telah ditetapkan dalam standar IEEE 1584-2002. Oleh karena itu, pada bab ini dijelaskan korelasi antara hasil simulasi dengan perhitungan standar. Dari besaran energi busur api yang dihasilkan dikelompokkan menjadi beberapa kategori berdasarkan standar NFPA 70E-2003 guna menentukan peralatan perlindungan diri yang sesuai untuk keselamatan pekerja yang dapat dilihat pada Tabel 2.

##### **Bus 1501-1 ( $I_a = 25,67 \text{ kA}$ )**

$$E_n = 25,67^{1,081} \times 10^{(-0,555 + 0 + 0,0011.1)}$$

$$= 33,39 \times 10^{(-0,5539)}$$

$$= 33,39 \times 0,28 = 9,35 \text{ Joule}/\text{cm}^2$$

$$E = C_f \times E_n \times (t/0,2)(610/D)^x$$

$$= 1 \times 9,35 \times (0,71/0,2)(610/457,2)^{0,973}$$

$$= 9,35 \times (3,55 \times 1,32) = 43,82 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

##### **Bus 3501-1 ( $I_a = 20,24 \text{ kA}$ )**

$$E_n = 20,24^{1,081} \times 10^{(-0,555 + 0 + 0,0011.1)}$$

$$= 25,82 \times 10^{(-0,5539)}$$

$$= 25,82 \times 0,28 = 7,23 \text{ Joule}/\text{cm}^2$$

$$E = C_f \times E_n \times (t/0,2)(610/D)^x$$

$$= 1 \times 7,23 \times (0,91/0,2)(610/457,2)^2$$

$$= 7,23 \times (4,55 \times 1,78) = 58,55 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

##### B. Standarisasi Besar Insiden Energi Arc-Flash Menurut IEEE 1584-2002 [1]

Perhitungan di bawah ini adalah menyesuaikan antara sistem yang telah ada atau *existing* dengan standar IEEE 1584-2002. Dilakukan dengan melakukan perubahan besar nilai *gap* = 153 mm dan *distance* = 914,4 mm agar sesuai dengan besaran yang telah ditetapkan oleh standar. Dengan cara

perhitungan yang sama seperti di atas maka diperoleh hasil seperti pada Tabel 3.

Tabel 4.  
Besarnya Insiden Energi *Existing* pada Tiap Bus

ID BUS	Insiden Energi ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )	Kategori
1501-1	34,51	4
1501-2	34,02	4
1501-3	36,07	4
1501-4	35,99	4
3501-1	45,07	<i>Exceeds</i>
15-1	35,90	4

Tabel 5.  
Hasil Energi Akibat Standarisasi dengan *Modified Calculation*

ID BUS	Gap (mm)	Distance (mm)	Insiden Energi ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )	Kategori
1501-1	153	914,4	25,83	4
1501-2	153	914,4	25,46	4
1501-3	153	914,4	26,99	4
1501-4	153	914,4	26,92	4
3501-1	153	914,4	16,53	3
15-1	153	914,4	26,87	4

##### C. Perhitungan dengan Menggunakan Metode Modifikasi [2]

##### 1. Modifikasi Perhitungan Busur Api pada PT. Pupuk Kaltim I (*Existing*)

Pada perhitungan busur api di bawah ini diketahui bahwa keadaan *existing* PT. Pupuk Kaltim I dalam sistem *ungrounded* atau *high-resistance*. Jarak antar konduktor / *gap* pada *switchgear* sebesar 1 mm dan jarak dengan pekerja (*distance*) 457,2 mm. Dengan menggunakan persamaan 6, besar energi busur api yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.

##### **Bus 1501-1 (0,71 s)**

$$\frac{1}{2} \text{ cycle } (0 - 0,035\text{s}) = 1,863 \times (15,83 + 8,7 + 2,36)^{1,063} \times 0,035$$

$$= 1,863 \times 33,19 \times 0,035 = 2,16 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$1,5\text{-}4 \text{ cycle } (0,035\text{-}0,067\text{s}) = 1,863 \times (14,04 + 8,73 + 1,43)^{1,063} \times 0,032$$

$$= 1,863 \times 29,58 \times 0,032 = 1,76 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$30 \text{ cycle } (0,067\text{-}0,41\text{s}) = 1,863 \times (14,23 + 8,78 + 1,81)^{1,063} \times 0,343$$

$$= 1,863 \times 31,17 \times 0,343 = 19,92 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$\text{CB F1-2 } (0,41\text{-}0,71\text{s}) = 1,863 \times (14,23 + 1,81)^{1,063} \times 0,3$$

$$= 1,863 \times 19,10 \times 0,3 = 10,67 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$\text{Jadi, energi bus 1501-1} = 2,16 + 1,76 + 19,92 + 10,67$$

$$= 34,51 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

##### **Bus 3501-1 (0,91 s)**

$$\frac{1}{2} \text{ cycle } (0 - 0,035 \text{ s}) = 2,510 \times (20,37 + 0,761)^{1,063} \times 0,035$$

$$= 2,510 \times 25,61 \times 0,035 = 2,25 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$1,5\text{-}4 \text{ cycle } (0,035\text{-}0,067 \text{ s}) = 2,510 \times (18,44 + 0,304)^{1,063} \times 0,032$$

$$= 2,510 \times 22,55 \times 0,032 = 1,81 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$30 \text{ cycle } (0,067 - 0,61 \text{ s}) = 2,510 \times (19,16)^{1,063} \times 0,543$$

$$= 2,510 \times 23,08 \times 0,543 = 31,46 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$\text{CB BKR-22 } (0,61 - 0,8 \text{ s}) = 2,510 \times (12,43)^{1,063} \times 0,19$$

$$= 2,510 \times 14,57 \times 0,19 = 6,95 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$(0,8 - 0,91 \text{ s}) = 2,510 \times (8,23)^{1,063} \times 0,11$$

$$= 2,510 \times 9,40 \times 0,11 = 2,60 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

$$\text{Jadi, energi bus 3501-1} = 2,25 + 1,81 + 31,46 + 6,95 + 2,60$$

$$= 45,07 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

Tabel 6.  
Perbandingan Energi Busur Api (*Existing*)

ID BUS	Standard Calculation (cal/cm <sup>2</sup> )	Modified Calculation (cal/cm <sup>2</sup> )
1501-1	43,83	34,51
1501-2	43,83	34,02
1501-3	47,69	36,07
1501-4	47,69	35,99
3501-1	58,43	45,07
15-1	47,69	35,90

Tabel 7.  
Perbandingan Energi Busur Api IEEE 1584-2002

ID BUS	Standard Calculation (cal/cm <sup>2</sup> )	Modified Calculation (cal/cm <sup>2</sup> )
1501-1	32,81	25,83
1501-2	32,81	25,46
1501-3	35,71	26,99
1501-4	35,71	26,92
3501-1	21,47	16,53
15-1	35,71	26,87

2. Modifikasi Perhitungan Busur Api pada PT. Pupuk Kaltim I (Standar IEEE 1584-2002)

Pada perhitungan busur api di bawah ini digunakan pendekatan jarak batas aman yang telah ditentukan berdasarkan standar IEEE 1584-2002. Dengan jarak antar konduktor / gap pada *switchgear* sebesar 153 mm dan batas dengan pekerja (*distance*) sejauh 914,4 mm. Dengan menggunakan persamaan 7 dan perhitungan yang sama seperti di atas, hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.

D. Perbandingan Besar Energi Busur Api antara Standar IEEE1584-2002 dengan Metode Modifikasi

Dari hasil besar energi yang diperoleh baik dengan perhitungan sesuai dengan standar IEEE 1584-2002 maupun dengan perhitungan modifikasi maka dapat diperoleh hasil perbandingan yang ditunjukkan pada Tabel 6 dan Tabel 7.

E. Perhitungan Besar Insiden Busur Api dengan Merubah Setting Waktu Rele Pengaman

1 Setting Rele Pengaman pada PT. Pupuk Kaltim 1A  
Typical 1A\_1

Gambar 2. dimulai dari trafo T67, rele F1-2, bus 1501-1, terhubung dengan bus 1501-2 kemudian rele F2-3 dan pembangkit 16 MW. Pada setting kali ini akan dilakukan perubahan setting *grading* waktu ( t ) menjadi 0,2s dengan spesifikasi dan jenis rele yang sama.

2. Setting Rele Pengaman pada PT. Pupuk Kaltim 1B  
Typical 1B\_1

Gambar 3. dimulai dari bus 3501-1, rele CB367, kabel84, bus 1501-3, rele K1-BKR-22 kemudian trafo 15 MVA yang terhubung dengan *tie-connection* dengan bus 1501-4, rele INC\_BSG dan pembangkit Borsig 11 MW. Pada koordinasi ini dilakukan penambahan rele baru yaitu rele 19 pada bus 3501-1 dengan *setting* waktu 0,3s dan *grading* waktu tetap sebesar 0,2s.

Typical 1B\_2

Gambar 4. dimulai dari bus 15-1, rele F4-2, bus 1501-4, rele INC\_BSG yang terhubung dengan *tie-connection* dengan bus 1501-3 dan rele K1-BKR-22. Pada koordinasi ini dilakukan

Tabel 8.  
Perbandingan Energi Busur Api Akibat Perubahan Setting Waktu

ID BUS	Existing		Resetting		Flash Protection Boundary (m)	
	FCT (s)	cal/cm <sup>2</sup>	FCT (s)	cal/cm <sup>2</sup>	Existing	Resetting
1501-1	0,71	43,83	0,51	31,48	18,58	13,22
1501-2	0,71	43,83	0,51	31,48	18,58	13,22
1501-3	0,91	47,69	0,71	37,21	20,27	15,71
1501-4	0,91	47,69	0,71	37,21	20,27	15,71
3501-1	0,91	58,43	0,31	14,79	18,41	6,09
15-1	0,91	47,69	0,31	16,25	20,27	6,70

Tabel 9.  
Setting Koordinasi Rele pada Gambar 2, 3 dan 4

Setting	Typical 1A_1		Typical 1B_1			Typical 1B_2		
	F1-2	F2-3	R_19	BKR_22	INC BSG	R_24	BKR_22	INC BSG
I <sub>lowset</sub> (A)	1500	-	1400	1500	-	2700	1500	-
Pickup	0,75	-	0,7	0,75	-	1,35	0,75	-
I <sub>highset</sub> (A)	2800	3000	2800	3000	2600	2800	3000	2600
Pickup	1,4	1,5	1,4	1,5	13	1,4	1,5	13
Time Dial	0,3	0,5	0,276	0,6	0,7	0,276	0,6	0,7

penambahan rele baru pada bus 15-1 yaitu rele 24 dengan *setting* waktu 0,3s dan *grading* waktu tetap 0,2s.

F. Perubahan Setting Waktu terhadap Besar Energi Busur Api dan Flash Protection Boundary

Perubahan *setting* t terhadap sela waktu antar rele bekerja dan pemilihan jenis kurva rele yang tepat ternyata dapat mereduksi besar energi busur api yang ditimbulkan. Selain untuk memberikan peringatan awal terhadap para pekerja, besar busur api dapat juga digunakan untuk menentukan batas jarak aman dari sumber busur api. Penurunan besar insiden energi busur api akibat perubahan *setting* t dapat lebih jelas dilihat pada Tabel 8. dengan membandingkan hasil *existing* dan masing-masing *typical* pada PT. Pupuk Kaltim I. Selain itu dapat dilihat kurva rele proteksi dari tiap-tiap *typical* pada Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4 dengan spesifikasi masing-masing rele tertera pada Tabel 9.

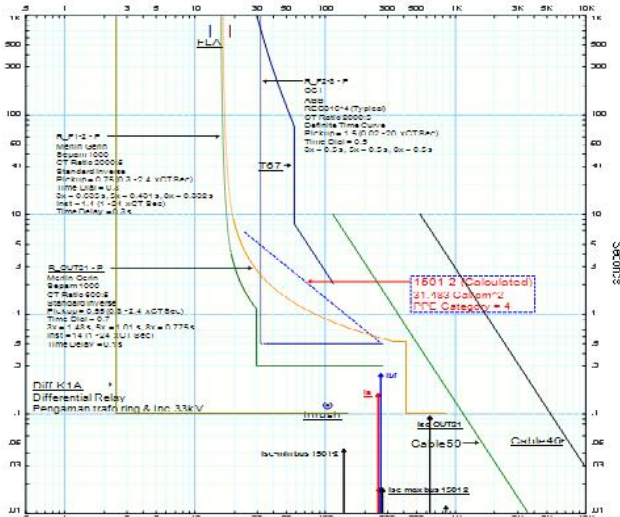
❖ Bus 1501-1 dan 1501-2

Existing

$$\begin{aligned}
 D_B &= [ 4,184 \times C_f \times E_n \times (t/0,2)(610^x/E_B) ]^{1/x} \\
 &= [ 4,184 \times 1 \times 9,35 \times (0,71/0,2)(610^{0,973}/5) ]^{1/0,973} \\
 &= [ 4,184 \times 9,35 \times 3,55 \times 102,60 ]^{1/0,973} \\
 &= [ 14248,82 ]^{1/0,973} \\
 &= 18579,89 \text{ mm} = 18,58 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Resetting

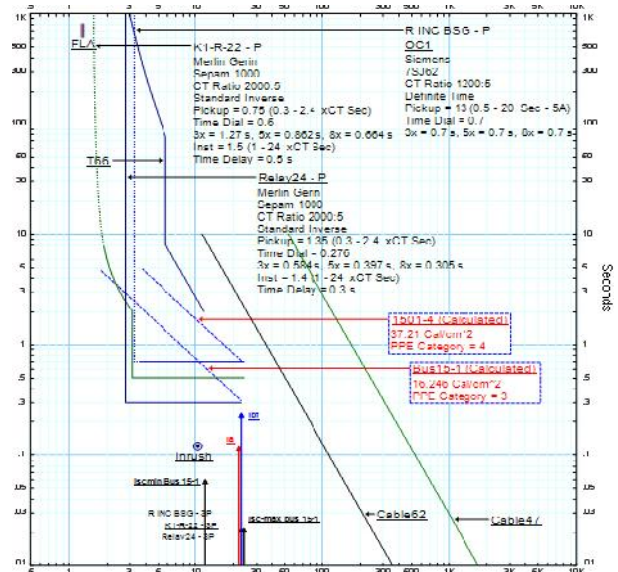
$$\begin{aligned}
 D_B &= [ 4,184 \times C_f \times E_n \times (t/0,2)(610^x/E_B) ]^{1/x} \\
 &= [ 4,184 \times 1 \times 9,35 \times (0,51/0,2)(610^{0,973}/5) ]^{1/0,973} \\
 &= [ 4,184 \times 9,35 \times 2,55 \times 102,60 ]^{1/0,973} \\
 &= [ 10235,07 ]^{1/0,973} \\
 &= 13224,15 \text{ mm} = 13,22 \text{ m}
 \end{aligned}$$



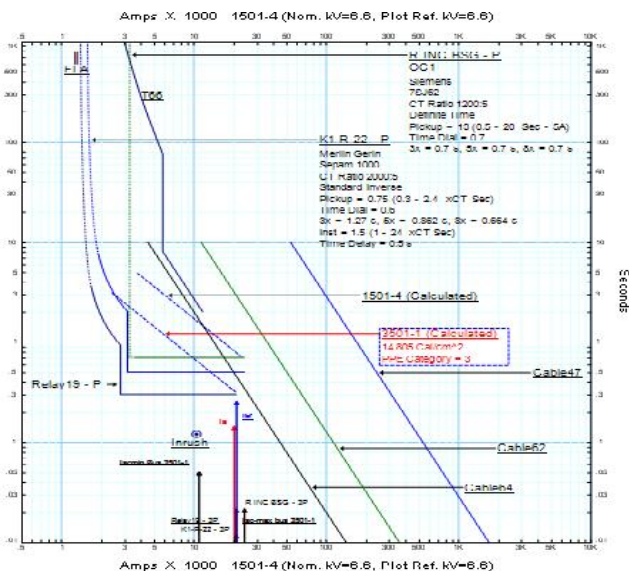
Gambar 2. Kurva Koordinasi Rele 1A\_1

Gambar 3. Kurva koordinasi Rele Kaltim 1B\_1

arus kontribusi dari motor sehingga diperoleh hasil yang lebih rendah daripada perhitungan IEEE 1584-2002.



Gambar 4. Kurva koordinasi Rele Kaltim 1B\_2



KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Dari hasil simulasi diketahui bahwa besar insiden energi busur api pada level tegangan menengah 6,6 kV di PT. Pupuk Kaltim I melebihi batas standar *Personal Protective Equipment (PPE)* yang diatur pada NFPA 70E-2003.
2. Hasil simulasi diketahui bahwa jarak antar konduktor (*gap*) dan jarak dengan pekerja (*distance*) pada masing-masing *switchgear* maupun MCC belum sesuai standar IEEE 1584-2002.
3. Secara keseluruhan *modified calculation method* digunakan sebagai salah satu cara perhitungan besar energi busur api pada tegangan menengah 6,6 kV di PT. Pupuk Kaltim I. Dengan memperhatikan waktu saat terjadinya gangguan hubung singkat (*time domain*) dan

Dimana pada kondisi awal masih *exceeds* setelah dimodifikasi turun menjadi kategori 4.

4. Penentuan *setting grading time* rele pada PT. Pupuk Kaltim I masih terlalu besar sehingga berpengaruh terhadap energi busur api yang dihasilkan. Besar energi busur api sangat dipengaruhi oleh *setting* dan *grading time* dari rele pengaman.
5. Pemilihan kategori alat perlindungan diri yang tepat dapat memberikan rasa aman dan nyaman bagi para pekerja sehingga dapat bekerja secara optimal. Selain itu juga untuk menghindari jatuhnya korban jiwa akibat ledakan busur api (*arc-blast*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis Rahmat Riyadi mengucapkan terima kasih pada PT. Pupuk Kaltim-Bontang yang telah berkenan untuk memberikan data-data penunjang selama proses penelitian berlangsung hingga terselesaikannya penulisan karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Std. 1584-2002., "IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation", by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2002.
- [2] Wu, Alex Y., "Modified Medium-Voltage Arc-Flash Incident Energy Calculation Method", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 46, No. 5, September/October, 2010.
- [3] Vajko, Rob., "The Basic Arc Flash Protection", © National Safety, Inc., 2008.
- [4] Hurst, Randolph W., "Electrical Safety and Arc Flash Handbook, volume 5", © National Safety, Inc., 2009.
- [5] Pfeiffer, John C., "Arc Flash Article", Pfeiffer Engineering Co., Inc., 2008.
- [6] Robert Luo, Ph.D., David Castor, P.E., "Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards", Published by ESA, Inc., 2003.
- [7] NFPA 70E., "Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces 2003 Edition", NFPA 70E-2003.