

Evaluasi Sistem Koordinasi Proteksi dengan Mempertimbangkan Busur Api pada *Substation* Tursina Timur PT.Kaltim Daya Mandiri (KDM)

Reyna Safilla Yusnianti, Margo Pujiantara, dan Sjamsjul Anam
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: margo@ee.its.ac.id

Abstrak—PT Kaltim Daya Mandiri (KDM) merupakan perusahaan penyedia utilitas dan energi yang didirikan untuk memenuhi kebutuhan suplai daya pada fasilitas produksi pupuk kaltim dan perumahan PT. Pupuk Kaltim serta perusahaan yang berada pada wilayah Kaltim Industrial Estate (KIE). Seiring dengan meningkatnya aktivitas industri, PT Kaltim Daya Mandiri merencanakan pengembangan sistem dengan penambahan pembebanan sebesar 5 MW pada daerah Tursina Timur. Dengan penambahan tersebut, tentu menimbulkan peningkatan arus hubung singkat yang memicu terjadinya gangguan. Salah satu gangguan yang mungkin terjadi yaitu bahaya busur api (Arc Flash) yang dapat membahayakan para pekerja di dalam pabrik dan merusak peralatan disekitarnya. Dalam pelaksanaan pengembangan penambahan beban tersebut, diperlukan perencanaan dan evaluasi sistem kelistrikan yang matang karena keandalan serta keamanan sebuah sistem kelistrikan adalah syarat utama yang harus dipenuhi maka studi busur api harus dilakukan. Evaluasi dilakukan dengan menghitung energi insiden berstandar IEEE 1584-2002 serta menentukan persyaratan dari pakaian pelindung bagi pekerja atau Personal Protective Equipment (PPE) berdasarkan National Fire Protection Association (NFPA) 70E. Sehingga, diharapkan kemungkinan terjadinya bahaya busur api pada sistem kelistrikan dapat diminimalkan dan dapat dijadikan bahan pertimbangan bagi PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM) kedepannya.

Kata Kunci—Busur Api, IEEE 1584-2002, National Fire Protection Association (NFPA) 70E, Personal Protective Equipment (PPE), PT KDM.

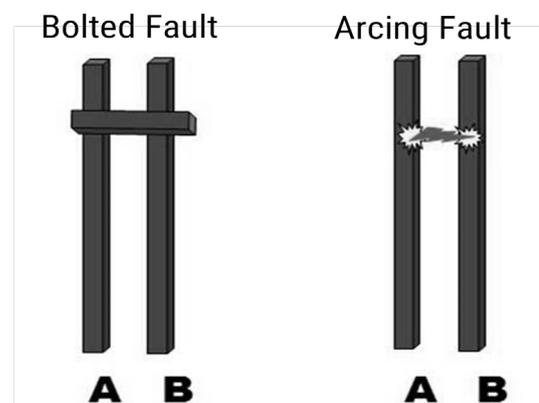
I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN energi listrik di Indonesia meningkat hingga 3% tiap tahunnya seiring dengan meningkatnya populasi penduduk dan meningkatnya aktivitas industri. Salah satu perusahaan yang [1]mengalami peningkatan kebutuhan listrik yaitu PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM). PT Kaltim Daya Mandiri (KDM) merencanakan pengembangan pada daerah Tursina Timur dengan penambahan beban sebesar 5 MW. Adanya penambahan beban tersebut, tentu mengakibatkan perubahan konfigurasi dari sistem kelistrikan yang memicu terjadinya gangguan dan memungkinkan sistem menjadi *black out*. Salah satu dampak yang ditimbulkan yaitu munculnya busur api (*arc flash*) [2].

Busur api (*arc flash*) merupakan peristiwa pelepasan energi panas yang sangat tinggi akibat adanya *arcing fault* atau *bolted fault* yang mengalir pada saluran yang seharusnya tidak teraliri, seperti arus yang mengalir antara fasa satu ke fasa lainnya, fasa ke netral, dan fasa ke tanah. Arus gangguan pada busur api dapat disebabkan oleh kegagalan isolasi, kegagalan mekanik, debu, korosi, atau kesalahan pekerja yang bekerja pada sistem kelistrikan yang mengakibatkan

Tabel 1.

Jenis Kurva	Koefisien		
	k	α	β
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02	2,97
<i>Very Inverse</i>	13,5	1	1,5
<i>Long Time Inverse</i>	120	1	13,33
<i>Extremely Inverse</i>	80	2	0,808
<i>Ultra Inverse</i>	315,2	2,5	1

Gambar 1. Perbedaan *Bolted Fault* dan *Arcing Fault*.

ledakan, radiasi panas, cahaya yang menyilaukan, dan tekanan yang sangat besar [3].

Oleh sebab itu, demi menjaga keamanan dan keselamatan pekerja dari bahaya busur api serta menjaga kontinuitas daya listrik pada sistem kelistrikan PT Kaltim Daya Mandiri (KDM), diperlukan evaluasi koordinasi proteksi dengan *setting* rele yang tepat saat sistem dalam kondisi eksisting dan melakukan perhitungan arus gangguan, energi insiden, serta jarak batas aman busur api berdasarkan IEEE 1584-2002 serta menentukan Alat Pelindung Diri (APD) atau dikenal juga dengan *Personal Protective Equipment* (PPE) bagi para pekerja sesuai tingkatan energi busur api dan jarak aman pelindung atau biasa disebut dengan *flash protection boundary* dalam *National Fire Protection Association* (NFPA) 70E agar pemilihan peralatan pengaman dapat diperhitungkan untuk mengurangi level energi insiden busur api tersebut.

II. METODE PENELITIAN

A. Proteksi Sistem Tenaga Listrik

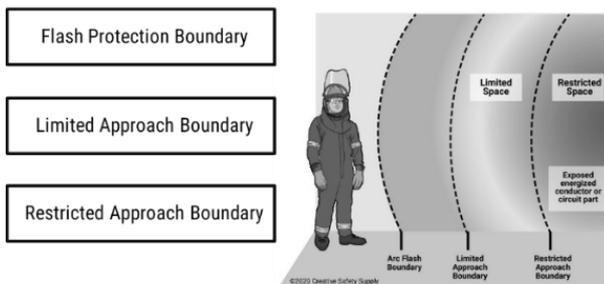
Sistem proteksi yang baik merupakan bagian yang penting dalam suatu sistem kelistrikan sebagai penunjang dalam menjaga kontinuitas proses produksi industri dalam mengurangi dampak terjadi gangguan. Gangguan yang sering

Tabel 3.
Eksponen Faktor Perhitungan

Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Gap antar konduktor (mm)	Jarak factor x (mm)
0.208-1	<i>Open air</i>	10-40	2.000
	<i>Switchgear</i>	32	1.473
	<i>MCC and panels</i>	25	1.641
	<i>Cable</i>	13	2.000
>1-5	<i>Open air</i>	102	2.000
	<i>Switchgear</i>	13-102	0.973
>5-15	<i>Cable</i>	13	2.000
	<i>Open air</i>	13-153	2.000
	<i>Switchgear</i>	153	0.973
	<i>Cable</i>	13	2.000

Tabel 4.
Jarak Kerja Berdasarkan IEEE 1584-2002

Kelas Peralatan	Jarak Kerja (mm)
15kV <i>Switchgear</i>	910
5 kV <i>Switchgear</i>	910
Low-Voltage <i>Switchgear</i>	610
<i>Low voltages MCCs and panelboards</i>	455
<i>Cable</i>	455



Gambar 3. Zona Jarak Batas Aman Busur Api (*Flash Protection Boundary*).

terjadi pada sistem kelistrikan merupakan gangguan beban lebih (*overload*) dan gangguan hubung singkat (*short circuit*).

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh peralatan proteksi adalah:

- Selektif : Dapat mendeteksi atau menentukan lokasi terjadinya gangguan dan hanya mengisolasi tempat terjadi gangguan
- Stabilitas : Dapat menjaga bagian yang tidak terganggu tetap beroperasi secara normal
- Sensitif : Dapat mendeteksi gangguan terkecil dan beroperasi sesuai settingnya.
- Kecepatan : Dapat beroperasi secara cepat dalam mendeteksi dan mengamankan gangguan [4].

B. Rele Pengaman Arus Lebih (*Overcurrent Relay*)

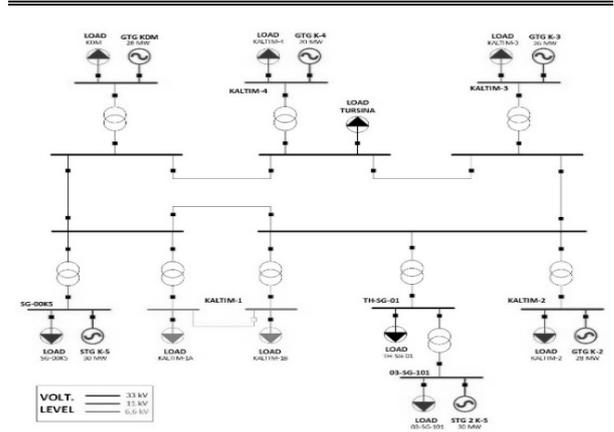
Rele Arus Lebih (*Overcurrent Relay*) digunakan untuk mendeteksi gangguan berdasarkan arus lebih yang mengalir pada suatu sistem tenaga listrik dan mengirimkan sinyal untuk *trip* ke *circuit breaker*, sehingga aliran daya antara area yang terkena gangguan dan area yang normal dapat dipisahkan [5]. Berdasarkan prinsip kerjanya, rele arus lebih (*Overcurrent Relay*) dibedakan menjadi tiga jenis

1) Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse-Time Delay Overcurrent Relay*)

Rele arus lebih waktu terbalik memiliki waktu operasi yang berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Semakin besar arus gangguan yang mengalir maka semakin

Tabel 2.
Kategori *Personal Protective Equipment* berdasarkan NFPA 70 E

Kategori Bahaya	Level Energi (Cal/cm ²)	<i>Personal Protective Equipment (PPE)</i>
0	0,0-1,2	- Pakaian Bahan Katun - Baju Lengan Panjang - Celana Panjang - Pelindung Mata - Pelindung Telinga - Sarung Tangan Pelindung - Seperti Kategori 0
1	1,2-4,0	- Pelindung Kepala dengan Pelindung Wajah - Sepatu - Seperti Kategori 1
2	4,0-8,0	- Kaos <i>T Shirt</i> dengan bahan <i>natural fiber</i> - Pakaian dengan Baju Lengan, Panjang Sekaligus Celana Panjang Tertutup - Seperti Kategori 2
3	8,0-25,0	- Jaket dan celana <i>Suite</i> dengan <i>Arc Rated 25 cal/cm²</i> - Pelindung Kepala dengan <i>Arc Rated 25 cal/cm²</i> - Seperti Kategori 2
4	25,0-40,0	- Jaket dan celana <i>Suite</i> dengan <i>Arc Rated 40 cal/cm²</i> - Pelindung Kepala dengan <i>Arc Rated 40 cal/cm²</i>



Gambar 2. *Single Line Diagram* PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM).

cepat waktu operasi rele dalam memutus gangguan. Begitu juga sebaliknya, saat arus gangguan kecil, waktu operasi rele yang dibutuhkan juga semakin lama [6].

Pengaturan rele arus lebih waktu terbalik terbagi menjadi dua yaitu pengaturan arus *pick up* dan pengaturan waktu kerja (*time-dial*). Berdasarkan standarnya, batas pengaturan arus *pick up* adalah :

$$1,05 FLA \leq Iset \leq 1,4 FLA \tag{1}$$

Iset : arus *pickup* rele (A)

FLA : arus beban penuh atau disebut juga *full load Ampere* dari peralatan (A)

Pengaturan arus *pickup* pada rele ditentukan berdasarkan pemilihan *tap* yang dapat dihitung dengan rumus berikut :

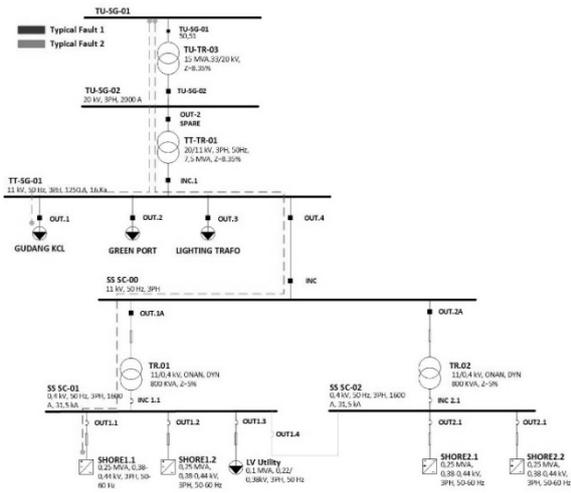
$$Tap = \frac{Iset}{Primer CT} \tag{2}$$

Iset : arus *pickup* rele (A)

Primer CT : rasio belitan primer transformator arus

Kemudian untuk pengaturan waktu kerja (*time-dial*) adalah sebagai berikut :

$$t = \frac{k \times TDS}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{Iset} \right)^\alpha - 1 \right]} \tag{3}$$



Gambar 5. Single Line Diagram Substation Tursina Timur PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM).

Tabel 6. Data Perbandingan Besar Energi Insiden Busur Api Untuk Kondisi Eksisting Menggunakan standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Tegangan (kV)	Simulasi Energi Insiden	Perhitungan Energi Insiden	Kategori Level Bahaya
SS SC-01	0,4	20,80 cal/cm ²	20,80 cal/cm ²	D/3
SS SC-02	0,4	20,94 cal/cm ²	20,37 cal/cm ²	D/3
SS SC-00	11	3,5 cal/cm ²	3,492 cal/cm ²	B/1
TT SG-01	11	3,5 cal/cm ²	3,492 cal/cm ²	B/1
TU-SG-02	20	24,412 cal/cm ²	24,507 cal/cm ²	D/3
TU-SG-01	33	50,53 cal/cm ²	50,733 cal/cm ²	F/ (>4)

- T : Waktu operasi rele (detik)
- TDS : Time Dial Setting
- I : Arus gangguan (A)
- Iset : Arus pickup rele (A)
- k, α, β: koefisien kurva *inverse*

Koefisien kurva rele terbaik/invers dapat dilihat pada Tabel 1.

2) Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (Definite Time Delay Overcurrent Relay)

Rele arus lebih waktu tertentu ini bekerja ketika nilai arus gangguan melebihi dari arus *pickup* yang ditetapkan, maka rele ini akan bekerja untuk memutus gangguan pada waktu yang sama (*definite*) atau pada waktu tunda (*time delay*) yang ditentukan [7]. Pengaturan rele arus lebih waktu tertentu adalah :

$$1,6 I_n \leq I_{set} \leq 0,8 I_{SC\ min} \tag{4}$$

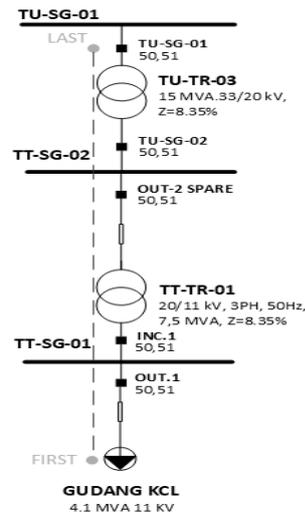
- I_n : arus nominal dari peralatan (A)
- I_{SC min} : arus hubung singkat minimum (A)

3) Rele Arus Lebih Waktu Seketika (Instantaneous Time Overcurrent Relay)

Rele arus lebih waktu instan bekerja ketika arus yang mengalir sudah melebihi sedikit saja dari batas arus pickup yang ditetapkan tanpa adanya penundaan waktu [8]. Untuk pengaturan hanya dapat dilakukan dari arus sesuai nilai pick up yang ditentukan dari perhitungan :

Tabel 5. Data Perbandingan Besar Flash Protection Boundary Untuk Kondisi Eksisting Menggunakan standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Kondisi Eksisting	
	Simulasi Flash Protection Boundary (m)	Perhitungan Flash Protection Boundary (m)
SS SC-01	4,227	4,24
SS SC-02	4,246	4,179
SS SC-00	2,743	2,753
TT SG-01	2,743	2,753
TU-SG-02	4,132	4,131
TU-SG-01	5,945	5,944



Gambar 4. SLD Tipikal 2.

$$I_{set} \leq 0.8 \times I_{sc\ min} \tag{5}$$

Selain penentuan batas arus pick up pada tiap rele pengaman, perlu ditentukan waktu tunda rele pengaman. Berdasarkan standar IEEE Std 242, waktu tunda minimum rele dalam beroperasi diatur sebesar 0,2-0,4 s [9].

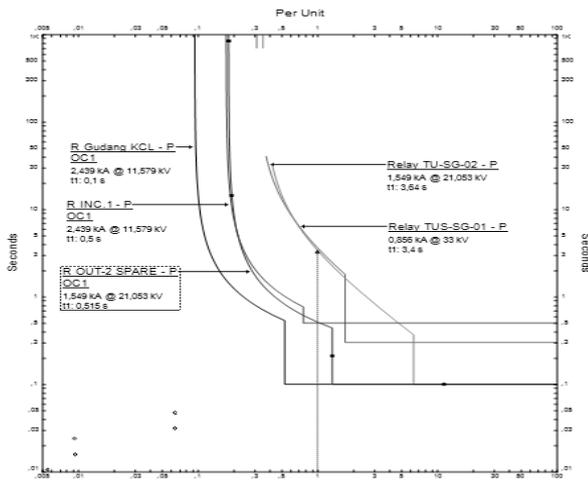
C. Busur Api (Arc Flash)

Busur api (*arc flash*) merupakan peristiwa pelepasan energi panas yang sangat tinggi disebabkan terjadinya gangguan pada sistem kelistrikan (*arcing fault* dan *bolted fault*) yang mengalir pada saluran yang seharusnya tidak teraliri akibat hubung singkat. seperti arus yang mengalir antara fasa satu ke fasa lainnya, fasa ke netral, dan fasa ke tanah. Perbedaan bolted fault dan arcing fault dapat dilihat pada Gambar 1.

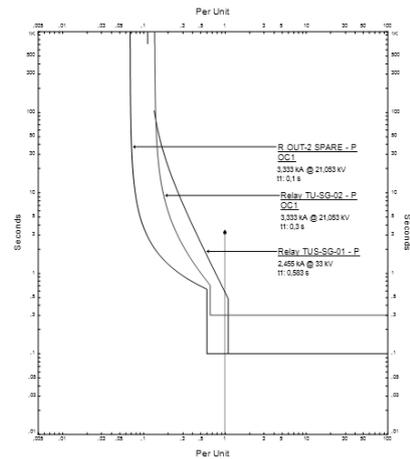
Arcing fault adalah arus gangguan yang mengalir melalui udara, antara konduktor dengan konduktor maupun konduktor ke tanah dan *bolted fault* adalah hubungan singkat yang terjadi diantara 2 konduktor dengan beda potensial yang impedansinya dan tahanan diantara konduktor sama dengan nol (melalui perantara).

D. Perhitungan Energi Busur Api

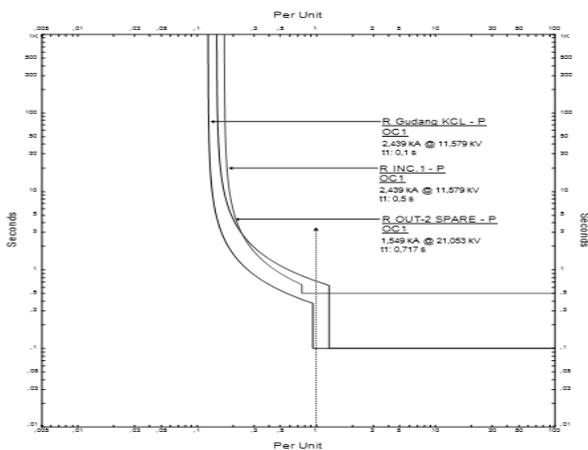
Berdasarkan standar IEEE 1584-2002, Untuk mencari nilai energi busur api, yang harus dilakukan yaitu mencari nilai arus *arcing fault* terlebih dahulu.



Gambar 7. Kurva TCC Eksisting Tipikal 2.



Gambar 6. Kurva TCC Tipikal 2 Saat Terjadi Gangguan di Trafo TT-TR-01 20 kV.



Gambar 8. Kurva TCC Tipikal 2 Saat Terjadi Gangguan di G. KCL 11 kV.

Tabel 7.

Data Perbandingan Besar Energi Insiden Busur Api Untuk Kondisi Resetting Menggunakan standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Tegangan (kV)	Simulasi Energi Insiden	Perhitungan Energi Insiden	Kategori Level Bahaya
SS SC-01	0,4	4,43 cal/cm ²	4,42 cal/cm ²	C/2
SS SC-02	0,4	3,39 cal/cm ²	3,39 cal/cm ²	B/1
SS SC-00	11	1,73 cal/cm ²	1,733 cal/cm ²	A/1
TT SG-01	11	2,89 cal/cm ²	2,888 cal/cm ²	B/1
TU-SG-02	20	13,68 cal/cm ²	13,730 cal/cm ²	D/3
TU-SG-01	33	30,66 cal/cm ²	30,815 cal/cm ²	E/4

Arus *arcing fault* pada tegangan <1kV yaitu

$$I_g I_a = K + 0,662 I_g I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 + 0,5588 V (I_g I_{bf}) - 0,00304 G (I_g I_{bf}) \quad (6)$$

Arus *arcing fault* pada tegangan 1 kV < X < 15 kV yaitu

$$I_g I_a = 0,00402 + 0,983 I_g I_{bf} \quad (7)$$

I_g : Log₁₀

I_a : Arus *arcing* (kA)

K : Konstanta untuk konfigurasi terbuka = -0,153 dan konstanta untuk konfigurasi box = -0,097

$I_g I_{bf}$: *Bolted fault current* (symmetrical RMS) (kA)

V : Tegangan sistem (kV)

G : Jarak celah antar konduktor (mm)

Setelah nilai *arcing fault*, perhitungan besarnya energi insiden dapat dihitung berdasarkan level tegangan terbagi menjadi dua, yaitu.

Energi insiden busur api pada tegangan < 15 kV

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (8)$$

Energi insiden busur api pada tegangan > 15 kV

$$E = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (9)$$

E : Energi insiden (J/cm²)

C_f : Faktor Pengali yang bernilai 1 untuk tegangan di atas 1 kV dan bernilai 1,5 untuk tegangan di bawah 1kV.

E_n :Energi insiden yang dinormalisasi ($10^{K1+K2+1.081(\lg I_a)+0.0011 G}$)

Dimana,

K1 = -0,792 untuk *open configuration* dan -0,555 untuk *box configuration* (panel, *switchgear*)

K2 = 0 untuk sistem tidak diketanahkan atau dengan *high resistant grounding* dan -0,113 untuk sistem diketanahkan

I_a = Arus *Arcing fault* (kA)

G = gap antara bus bar dan konduktor (milimeter)

t : Lama waktu terjadinya busur api (detik)

D : Jarak kerja (mm)

x: Faktor eksponen jarak antar konduktor (mm)

V : Level tegangan bus (kV)

I_{bf} : Arus *bolted* (kA)

Adapun data eksponen jarak yang digunakan untuk perhitungan energi busur api dapat dilihat pada tabel 2. Nilai jarak kerja dapat dilihat pada tabel 3.

E. Jarak Aman Busur Api (*Flash Protection Boundary*)

Berdasarkan NFPA 70-E, jarak aman busur api (*Flash Protection Boundary*) merupakan sebuah pendekatan mengenai batas dimana seorang atau pekerja akan menerima luka bakar tingkat dua jika terpapar busur api. Zona batas aman busur api (*flash protection boundary*) dapat dilihat pada Gambar 2. Perhitungngan FPB pada level tegangan <15 kV

Tabel 8.
Data Perbandingan Besar Flash Protection Boundary Untuk Kondisi Resetting Menggunakan standar IEEE 1584-2002

ID Bus	Kondisi Resetting	
	Simulasi Flash Protection Boundary (m)	Perhitungan Flash Protection Boundary (m)
SS SC-01	2,240	2,223
SS SC-02	1,871	1,857
SS SC-00	1,485	1,339
TT SG-01	2,511	2,264
TU-SG-02	3,579	3,092
TU-SG-01	4,635	4,632

Tabel 9.
Standar PPE yang di Rekomendasikan Sesuai NFPA 70E

ID Bus	Kategori Level Bahaya	Personal Protective Equipment (PPE)
SS SC-01	C/2	- Seperti Kategori 1 - Kaos <i>T Shirt</i> dengan bahan <i>natural fiber</i>
		- Pakaian dengan Baju Lengan, Panjang Sekaligus Celana Panjang Tertutup
SS SC-02	B/1	- Seperti Kategori 0
SS SC-00	A/1	- Pelindung Kepala
TT SG-01	B/1	- Pelindung Wajah
		- Sepatu
TU-SG-02	D/3	- Seperti Kategori 2 - Jaket dan celana <i>Suite</i> dengan <i>Arc Rated 40 cal/cm²</i>
		- Pelindung Kepala dengan <i>Arc Rated 40 cal/cm²</i>
TU-SG-01	E/4	- Seperti Kategori 2 - Jaket dan celana <i>Suite</i> dengan <i>Arc Rated 40 cal/cm²</i>
		- Pelindung Kepala dengan <i>Arc Rated 40 cal/cm²</i>

$$D_B = \sqrt[4]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)} \quad (10)$$

Perhitungan FPB pada level tegangan >15kV

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)} \quad (11)$$

D_B : Jarak aman antara pekerja dengan titik yang dimungkinkan menjadi sumber busur api (mm)

C_f : Faktor Pengali yang bernilai 1 untuk tegangan di atas 1 kV dan bernilai 1,5 untuk tegangan di bawah 1kV.

E_n : Energi insiden yang dinormalisasi

t : Lama waktu terjadinya busur api (detik)

x : Faktor eksponen jarak antar konduktor

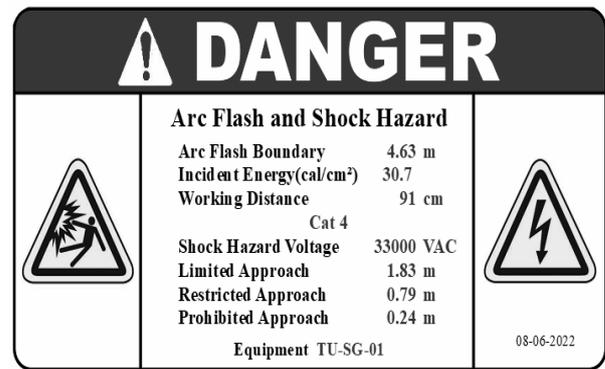
E_B : Energi insiden (J/cm²) pada jarak batas busur api, yaitu sebesar 5 J/cm²

I_{bf} : Arus gangguan *bolted* (kA)

V : Tegangan bus (kV)

F. Kategori Bahaya Busur Api dengan Personal Protective Equipment (PPE) berdasarkan standar NFPA 70E.

Pengelompokan kategori energi busur api dapat ditentukan setelah mendapatkan nilai insiden energi pada masing-masing bus ketika peristiwa busur api terjadi. Semakin besar kategori merepresentasikan bahwa bahaya busur api semakin berbahaya. Pengelompokan kategori tersebut bertujuan untuk menentukan alat pelindung diri (APD) atau *personal protection equipment* (PPE) bagi pekerja sesuai dengan NFPA 70E, dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 9. Label Bahaya Busur Api Pada Bus TU-SG-01 33 kV.

G. Labelling

Pemberian label busur api merupakan salah satu hal yang penting sebagai tanda peringatan bahaya akan adanya potensi busur api bagi setiap individu yang berada disekitar area bahaya busur api, khususnya para pekerja.

III. SISTEM KELISTRIKAN PT. KALTIM DAYA MANDIRI (KDM)

PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM) merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pupuk Kaltim serta sebagai suplai daya pada fasilitas produksi dan perumahan PT. Pupuk Kaltim. Sistem kelistrikan PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM) menggunakan konfigurasi sistem ring yang terdiri dari 3 level tegangan utama, yakni 33 kV, 11kV, dan 6.6 kV. Dalam memenuhi kebutuhan listrik sebesar 107.8 MW, suplai listrik didapatkan dari dua buah Steam Turbine Generator (STG) dan empat buah Gas Turbine Generator (GTG) yang berjalan secara bersamaan. Kemudian berdasarkan perencanaan pengembangan *substation* Tursina Timur sendiri memiliki sistem dengan tegangan 20 kV yang kemudian diturunkan menjadi 11 kV melalui transformer berkapasitas 7.5 MVA. Melalui sistem 11 kV tersebut, kemudian pembebanan akan dibagi menjadi 3 bagian yakni Green Port dengan kapasitas 2 MVA, Gudang KCL dengan kapasitas 2 MVA, dan trafo utilitas sebesar 0.2 MVA. Selain itu, terdapat rencana pembangunan infrastruktur kelistrikan untuk *shore connection* pada daerah Tursina Timur dengan tegangan utama 0.4 kV dan menggunakan asumsi kebutuhan tidak lebih dari 0.25 MVA setiap *shore connection*. Gambar 3 *single diagram* PT. KDM, Gambar 4 *single line diagram* tursina timur PT.KDM

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Busur Api Kondisi Eksisting pada Substation Tursina Timur PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM)

Analisis dilakukan dengan simulasi menggunakan software ETAP 12.6 dan perhitungan yang mengacu pada standar IEEE 1584-2002. Sedangkan untuk penentuan kategori level busur api serta peralatan perlindungan diri atau PPE menggunakan standar NFPA 70E. Simulasi dan analisis dilakukan pada level tegangan 33 kV, 20 kV, 11 kV, dan 0,4 kV, dapat kita lihat pada Tabel 5. Data perbandingan besar flash Flash Protection Boundary Untuk Kondisi Eksisting Menggunakan standar IEEE 1584-2002 dapat kita lihat pada Tabel 6.

Berdasarkan hasil simulasi dan juga perhitungan kondisi eksisting, terlihat pada bus TU-SG-02 dan TU-SG-01 memiliki nilai energi busur api maksimum yang lebih besar dari level 4 dan memiliki jarak yang cukup jauh. Untuk itu perlu dilakukan evaluasi pada sistem kelistrikan substation Tursina Timur yang dapat dilihat pada kurva TCC rele tipikal 2 yang mewakili bus tersebut.

Tipikal 1 merupakan koordinasi proteksi OCR terhadap gangguan fasa dimulai dari beban lumped load SHORE1.1 ke bus SS SC-01 dan dilanjut ke trafo TR 01 kemudian ke bus SS SC-00, bus TT-SG-01 dan dilanjut ke trafo TT-TR-01 kemudian ke bus TU-SG-02 ke dan berakhir pada trafo TU-TR-03. LVCB dan rele yang termasuk pada tipikal ini meliputi OUT1.1, INC1.1, OUT-1A, INC, OUT.4, INC.1 OUT-2 SPARE, dan TU-SG-02.

Tipikal 2 merupakan koordinasi proteksi OCR terhadap gangguan fasa dimulai dari beban lumped load GUDANG KCL ke bus TT-SG-01 dilanjut ke trafo TT-TR-01 lalu ke bus TU-SG-02 dan berakhir pada trafo TU-TR-03. LVCB dan rele yang termasuk pada tipikal ini meliputi OUT.1, INC.1, OUT-2 SPARE, dan TU-SG-02. Single line diagram untuk tipikal 2 dapat dilihat pada gambar 5.

Berdasarkan kurva TCC Gambar 6, terlihat bahwa sistem belum terkoordinasi dengan baik dikarenakan grading time atau waktu kerja antar rele pengaman belum sesuai dengan standar waktu tunda minimum 0,2-0,4 detik. Sehingga ketika terjadi gangguan, rele tidak bekerja sesuai dengan urutannya.

B. Analisis Busur Api Kondisi Resetting pada Substation Tursina Timur PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM)

Berdasarkan persamaan (1),(2),(3), dan (5) maka, koordinasi proteksi pada tipikal 2 dapat di *resetting*. Gambar 10 Kurva TCC Tipikal 2 Saat Terjadi Gangguan di G. KCL 11 kV. Gambar 11 Kurva TCC Tipikal 2 Saat Terjadi Gangguan di Trafo TT-TR-01 20 kV

Dengan hasil perhitungan dan simulasi kondisi *resetting* tipikal 2, terlihat bahwa sistem telah terkoordinasi dengan baik dan *grading time* telah memenuhi standar waktu tunda minimum, yaitu antara 0,2-0,4 detik. Setelah *resetting* sistem proteksi sudah sesuai, maka analisis busur api kondisi *resetting* dapat dilakukan. Tabel 10 Data Perbandingan Besar Energi Insiden Busur Api Untuk Kondisi Resetting Menggunakan standar IEEE 1584-2002

Dari tabel 8, terlihat bahwa besar nilai energi insiden busur api *Substation* Tursina Timur PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM) pada kondisi *resetting* mengalami penurunan dibandingkan dengan kondisi eksisting. Hal ini disebabkan karena pada kondisi eksisting rele pengaman belum terkoordinasi sesuai dengan standar. Selain nilai energi insiden, level kategori potensi bahaya busur api dan besar *Flash Protection Boundary* (FPB) juga mengecil. Contohnya seperti di bus TU-SG-01 yang mengalami penurunan nilai energi dari 50,53 cal/cm² dengan level kategori maksimum (F/>4) dan FPB 5,945 menjadi 30,815 cal/cm² FPB 4,635 dengan level kategori empat dan FPB 4,635. Penurunan level tersebut sudah sesuai dengan level pada standar NFPA 70E.

C. Rekomendasi Personal Protective Equipment (PPE) berdasarkan standar NFPA 70E

Setelah dilakukan serangkaian simulasi dan perhitungan dalam kondisi eksisting dan *resetting* didapatkan, maka rekomendasi *Personal Protective Equipment* (PPE) dapat diberikan. Tabel 11 Standar PPE yang di Rekomendasikan Sesuai NFPA 70E.

D. Labelling

Selain rekomendasi PPE, label tanda bahaya busur api dapat diberikan setelah mengetahui jarak aman bagi pekerja dan peralatan perlindungan yang tepat sesuai kategori energi busur api yang dihasilkan. Salah satu contoh label yang ada pada Bus TU-SG-01 gambar 9.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi koordinasi proteksi dan busur api yang diperoleh dari simulasi dan analisis data perhitungan yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut : (1) Sistem koordinasi proteksi kondisi eksisting pada *substation* Tursina Timur PT. Kaltim Daya Mandiri (KDM) belum terkoordinasi dengan baik, sehingga koordinasi rele pengaman harus disempurnakan untuk menghindari terjadinya *false tripping* pada masing-masing *island* yang berujung kepada *blackout* pada sistem; (2) Pada kondisi Eksisting, terdapat nilai energi insiden busur yang menunjukkan level maksimum atau melebihi kategori level menurut standar NFPA 70 E, contohnya pada bus TU-SG-01. Hal ini dikarenakan koordinasi antar rele pengaman belum sesuai dengan standar, sehingga FCT terlalu lama dan mengakibatkan nilai insiden energi menjadi sangat besar; (3) Setelah dilakukan *resetting*, terdapat perubahan pada karakteristik kurva rele pengaman agar kurva tidak saling bersinggungan; (4) Besar nilai energi insiden kondisi *resetting* pada tiap bus mengalami penurunan dibanding kondisi eksisting. Maka, level kategori bahaya busur api dan jarak aman pelindung atau *Flash Protection Boundary* (FPB) tiap bus menjadi lebih baik dan rekomendasi PPE bagi pekerja dapat diberikan dengan tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. PLN, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN," Jakarta, 2017.
- [2] J. Simms and G. Johnson, "Protective Relaying Methods for Reducing Arc Flash Energy," 2010. doi: 10.1109/CPRE.2010.5469495.
- [3] Canadian Electricity Forum Inc., *Electrical Safety and Arc Flash Handbook*, 5th ed. Pickering, Ont: Electricity Forum, 2009.
- [4] L. Hewitson, M. Brown, and R. Balakrishnan, *Practical Power System Protection*, vol. 4. Oxford; Burlington, MA: Elsevier/Newnes, 2004.
- [5] J Gers and E Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*, 2nd ed. Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [6] IEEE, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book) - IEEE Standard*. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2001. doi: 10.1109/IEEESTD.2001.93369.
- [7] Pfeiffer Engineering Co, *Arc Flash*. Pfeiffer Engineering Co, 2008.
- [8] IEEE Industry Applications Society, *Petroleum and Chemical Industry Committee. and Institute of Electrical and Electronics Engineers*. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2002.
- [9] NFPA 70E®, *Standard for Electrical Safety in the Workplace*. National Fire Prot. Assoc, NFPA 70E, 2015.