

Simplifikasi Analisa Bahaya *Arc Flash* Menggunakan Metode Kurva Batasan Energi pada PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim

Pande Aji Seta Kusalya, Margo Pujiantara, dan Ontoseno Penangsang
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: margo@ee.its.ac.id

Abstrak—Pada sistem kelistrikan sering terjadi fenomena busur api (*arc flash*), sehingga memerlukan analisa untuk menjamin keselamatan pekerja. Analisa busur api dilakukan untuk menentukan kategori Personal Protective Equipment (PPE) terhadap bahaya busur api guna menjamin keselamatan pekerja dari paparan insiden energi yang terpancarkan. Metode analisa busur api secara umum menggunakan standard IEEE 1584-2002 untuk melakukan analisis bahaya busur api, dimana metode tersebut memerlukan banyak parameter yang diperlukan untuk menentukan kategori PPE setiap bus. Jika kelistrikan tersebut terdapat banyak bus, maka akan memakan banyak waktu untuk menentukan kategori PPE. Dengan menggunakan metode kurva batasan energi (*energy boundary curve*), untuk menentukan kategori PPE secara singkat dan lebih sederhana sesuai dengan ketentuan National Fire Protection Association (NFPA) 70E-2015 hanya memerlukan kurva karakteristik pengaman bus. Dimana kurva karakteristik pengaman bus akan dipotong dengan kurva batas energi, sehingga pada perpotongan kedua kurva tersebut dapat ditentukan kategori PPE yang diperlukan. Studi aktual mengenai simplifikasi analisa busur api dilakukan pada PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim. Pada hasil akhirnya, analisa busur api menggunakan metode kurva batas energi pada tiap bus dapat menentukan proses penentuan kategori PPE yang lebih singkat dan sederhana daripada menggunakan metode standard IEEE 1584-2002. Namun, menimbulkan perbedaan jarak batas aman (*flash protection boundary*), dikarenakan metode kurva batasan energi tidak memperhitungkan nilai insiden energi serta *fault clearing time*.

Kata Kunci—Busur Api, Kurva Batas Energi, Jarak Batas Aman, *Personal Protective Equipment* (PPE).

I. PENDAHULUAN

PADA sistem kelistrikan PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim ini terdapat pengembangan sistem dari sistem eksisting menjadi sistem Ultimate. Saat ini, digunakan sistem Ultimate dimana hanya terdapat 2 level tegangan yaitu 0,4 kV dan 6 kV. Hal ini bertujuan untuk menyederhanakan sistem dan pada sistem kelistrikan ini juga terdapat penambahan beban *Open Access A* dan *Open Access B*.

Pada kondisi saat ini, pembangkitan pada PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim memiliki 4 buah generator yaitu 2 buah *Generator Turbine Gas* baru dengan kapasitas 2,25 MW dan 2 buah *Diesel Engine Generator* dengan kapasitas 1,2 MW, akibat adanya rencana pengembangan dan peluang penyempurnaan sistem dengan menambahkan generator gas turbine dengan memanfaatkan gas flare (tidak menggunakan natural gas) yang akan masuk pada bus 6 kV serta mempertimbangkan peninjauan ulang sistem kelistrikan yang stabil dan apabila terjadi gangguan pada sistem kelistrikan hingga terjadinya busur api (*arc flash*) para pekerja mendapatkan keamanan yang terjamin.

Tabel 1.

Data Jarak Celah Bus

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

Tabel 2.

Data Parameter yang Dibutuhkan untuk Perhitungan Insiden Energi

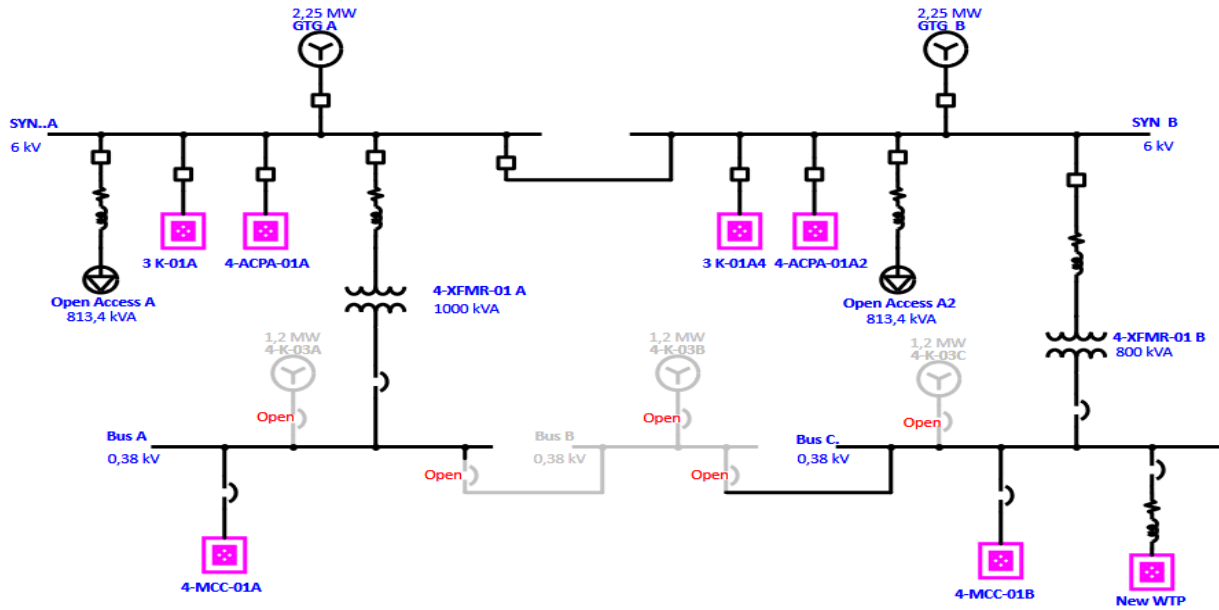
Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)	Jarak <i>Exponent</i>	Jarak Kerja (mm)
0,208 - 1	<i>Open air</i>	10-40	2	-
	<i>Switchgear</i>	32	1,473	455
	<i>MCC and panels</i>	25	1,641	455
	<i>Cable</i>	13	2	455
>1 - 5	<i>Open air</i>	102	2	-
	<i>Switchgear</i>	13-102	0,973	610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

Adanya pengembangan dan penyempurnaan sistem kelistrikan PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim, maka dibutuhkan evaluasi lebih dalam agar terhindar dari gangguan-gangguan yang tidak diinginkan. Salah satu gangguan yang dapat mengancam keselamatan para pekerja di lapangan yaitu akibat bahaya busur api. Dari bahaya yang dapat ditimbulkan busur api, maka diperlukan sebuah metode untuk menganalisis fenomena busur api. Analisis busur api diperlukan dalam penentuan kategori peralatan perlindungan diri atau *Personal Protective Equipment* (PPE). Metode yang digunakan adalah menggunakan metode kurva batas energi. Dengan metode ini, dapat mempersingkat analisa penentuan kategori PPE berdasarkan dari nilai insiden energi yang dihasilkan oleh fenomena busur api.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Busur Api (*Arc Flash*)

Arc flash adalah kondisi yang berbahaya akibat adanya pelepasan energi. Busur api listrik tersebut timbul karena adanya arus gangguan atau *arcing fault* pada sebuah sistem kelistrikan. *Arcing fault* merupakan arus gangguan yang mengalir melalui udara antara konduktor dengan konduktor atau konduktor dengan tanah. Arus tersebut menciptakan sebuah plasma busur listrik dan melepaskan sejumlah energi yang berbahaya.



Gambar 1. Sistem kelistrikan PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim.

Efek yang dihasilkan *arc flash* dapat berupa ledakan, radiasi panas, cahaya yang menyilaukan, dan tekanan yang sangat besar. Temperatur dari radiasi panas yang dihasilkan dapat mencapai sekitar 35.000 F [1]. Hal tersebut tentu sangat berbahaya karena menyebabkan kerusakan pada peralatan, luka bakar dan hingga kematian pada orang yang berada dekat dengan ledakan. Oleh karena itu, level energi harus diminimalkan sesuai parameter kategori energi berdasarkan NFPA 70E-2015. Dengan tingkat energi *arc flash* yang sesuai maka dapat ditentukan *Personal Protective Equipment* (PPE) bagi pekerja.

B. Perhitungan Energi Arc Flash Sesuai Standard IEEE 1584-2002

Pada metode ini, hal pertama yang diperhitungkan adalah mencari nilai arus *arcing fault*. Persamaan untuk menghitung dari arus *arcing fault* tergantung dari besarnya level tegangan bus. PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim menggunakan level tegangan 0,4 kV dan 6 kV, maka persamaan arus *arcing fault* untuk level tegangan dibawah 1 kV sebagai berikut [2]:

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf}) \tag{1}$$

Sedangkan untuk level tegangan 1 – 15 kV, digunakan persamaan arus *arcing fault* sebagai berikut:

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \tag{2}$$

Persamaan dari I_a sebagai berikut:

$$I_a = 10^{\lg I_a} \tag{3}$$

Dimana:

$\lg = \log_{10}$

$I_a =$ arus arcing (kA)

$K =$ konstanta konfig. terbuka = -0,153, konfig. tertutup = -0,097

$\lg I_{bf} =$ bolted fault current pada gangguan tiga fasa (kA)

$V =$ tegangan sistem (kV)

$G =$ jarak celah antar konduktor (mm)

Setelah mendapatkan nilai *arcing current*, dilakukan

perhitungan nilai energi insiden. Dalam perhitungan besar energi normal, menggunakan referensi waktu arcing dengan durasi 0,2 detik dan jarak dari titik arcing ke manusia sebesar 610 mm. Untuk menghitung besarnya energi insiden digunakan persamaan sebagai berikut [3]:

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \tag{4}$$

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)

$K2 = 0$ sistem underground and $-0,113$ untuk sistem grounded

$G =$ jarak/celah antar konduktor (mm)

Untuk mendapatkan nilai G (jarak antar konduktor) dapat dilihat pada Tabel 1. Pada Tabel 1 dijelaskan jarak celah bus pada beberapa peralatan berdasarkan dari IEEE 1584-2002. Selanjutnya, besar energi E_n dapat diketahui: $E_n = 10^{\lg E_n}$

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

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \tag{5}$$

Dimana:

$E =$ incident energy (J/cm^2)

$C_f =$ faktor perhitungan atau pengali 1,0 untuk tegangan diatas 1kV 1,5 untuk tegangan dibawah 1 kV

$E_n =$ incident energy normalized

$t =$ waktu arcing (detik)

$D =$ jarak kerja (mm)

$x =$ jarak exponent

Untuk menghitung level insiden energi busur api, digunakan data parameter-parameter pada Tabel 2 yang dibutuhkan untuk perhitungan insiden energi.

C. Perhitungan Energi Arc Flash Menggunakan Metode Kurva Batasan Energi

Insiden energi menurut IEEE 1584-2002 didefinisikan

Tabel 3.
Data Arus Gangguan Bolted dan FCT

No	BUS ID	Tegangan (kV)	Isc Bolted (kA)	FCT (sec)
1	SYN A	6	2,074	0,365
2	Bus 752	0,38	7,271	0,550
3	Booster Pump	0,38	7,271	0,350
4	Bus A	0,38	16,288	0,55
5	Bus 1	0,38	16,288	0,350
6	SYN B	6	2,134	0,365
7	Bus 13	0,38	5,600	0,550
8	WTP 1	0,38	5,600	0,350
9	Bus C	0,38	18,628	0,550
10	Bus 5	0,38	18,628	0,350

Tabel 4.
Hasil Perhitungan Busur Api Menggunakan Standard IEEE 1584-2002

No	BUS ID	Arus Arcing (kA)	Insiden energy (cal/cm ²)	Kategori bahaya (level)
1	SYN A	2,068	1,107	0
2	Bus 752	4,227	4,570	2
3	Booster Pump	4,227	2,908	1
4	Bus A	7,911	11,673	3
5	Bus 1	8,324	12,364	3
6	SYN B	2,126	1,141	0
7	Bus 13	3,549	5,960	2
8	WTP 1	3,451	2,335	1
9	Bus C	8,781	13,066	3
10	Bus 5	9,266	13,833	3

sebagai jumlah energi yang besar di permukaan, pada jarak tertentu dari sumber yang dihasilkan selama terjadinya busur listrik. Untuk menghitung busur api dengan kurva batas energi dibedakan menjadi dua, yaitu pada tegangan kurang dari 15kV dan pada tegangan lebih dari 15kV. Persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$t = \frac{E}{A_1 E_n} \text{ (detik)} \tag{6}$$

Nilai E_n dan t bergantung pada besarnya arus gangguan pada lokasi yang dipertimbangkan dan karakteristik dari peralatan proteksi arus lebih atau bagian yang bertugas mengamankan bus pada saat gangguan juga akan mempengaruhi t atau lama waktu gangguan arcing. Dimana A_1 adalah konstanta, dirumuskan sebagai berikut:

$$A_1 = 4,184 \frac{C_f}{0,2} \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \tag{7}$$

Keterangan:

- E = incident energy (J/cm^2)
- E_n = incident energy normalized (J/cm^2)
- C_f = faktor perhitungan
- D = jarak pekerja dari sumber arc (mm)
- x = jarak exponent

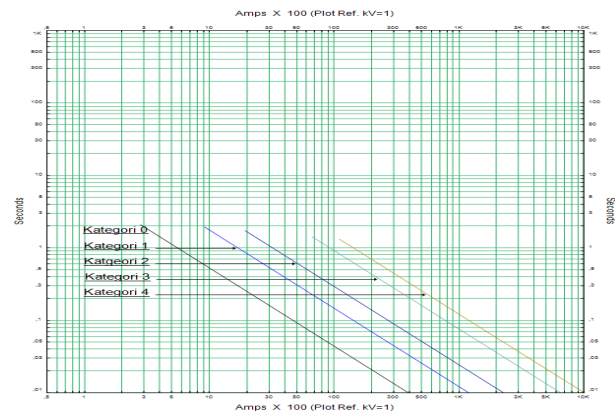
Untuk menggabungkan persamaan (4) dengan persamaan (6), maka konstanta yang ada pada persamaan (4) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$A_2 = K_1 + K_2 + 0,0011 G \tag{8}$$

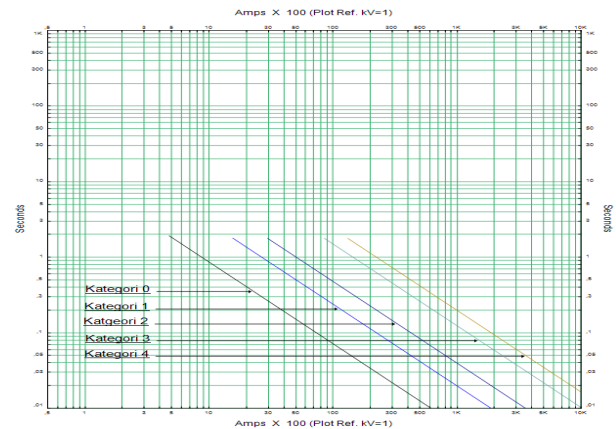
$$A'_2 = 10^{A_2} \tag{9}$$

Keterangan:

- $K1$ = -0,792 konfigurasi terbuka -0,555 untuk konfigurasi box
- $K2$ = -0,113 sistem grounded 0 untuk sistem ungrounded dan high resistance grounded



Gambar 2. Kurva batasan energi pada level tegangan < 1 kV.



Gambar 3. Kurva batasan energi pada level tegangan 1-15 kV.

G = jarak/celah antar konduktor (mm)

Dengan menggabungkan persamaan (6) dengan persamaan (4), maka diperoleh persamaan kurva batas energi sebagai berikut:

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}} \text{ (detik)} \tag{10}$$

Setelah mendapatkan semua konstanta sesuai konfigurasi dari sistem dan nilai dari insiden energi yang didapatkan berdasarkan kategori PPE, maka persamaan (2.11) dapat digunakan untuk menentukan kurva hubungan arus terhadap waktu yang sesuai dengan level insiden energi yang dipilih.

D. Flash Protection Boundary

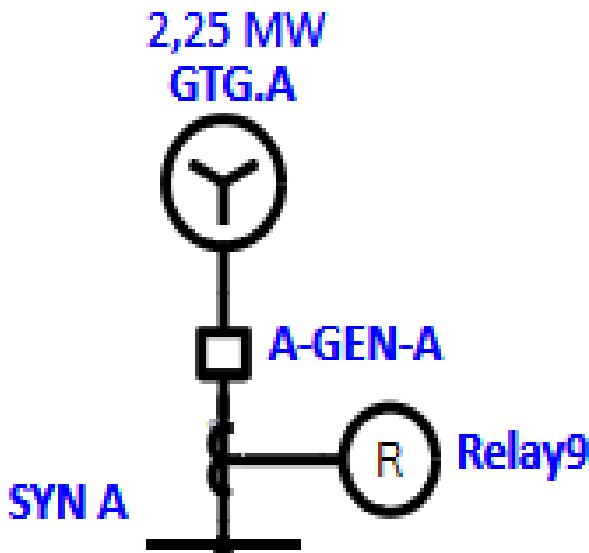
Persamaan untuk perhitungan jarak batas aman perlindungan sesuai IEEE 1584-2002 mengacu pada besarnya insiden energi normalisasi dari *arc flash*. Namun, metode kurva batas energi tidak didapatkan nilai dari insiden energi serta fault current time. Sehingga, untuk perhitungan dengan metode kurva batas energi menggunakan nilai energi insiden maksimum setiap kategori maka yang diperoleh adalah nilai jarak maksimum untuk setiap kategori. Persamaan level insiden energi (E_{WD}) untuk sistem tegangan pada jarak kerja (D_{WD}) sebagai berikut:

$$E_{WD} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D_{WD}^x} \right) \tag{11}$$

Untuk persamaan energi insiden (E_B) pada jarak batas busur api (D_B) sebagai berikut:

$$E_{WD} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D_B^x} \right) \tag{12}$$

Jarak aman tiap kategori PPE dapat dicari dengan



Gambar 5. Rele 9 sebagai pengaman SYN A.

menggabungkan persamaan (11) dengan (12):

$$\frac{E_B}{E_{WD}} = \left(\frac{D_B}{D_{WD}}\right)^{-x} \tag{13}$$

$$D_B = \frac{D_{WD}}{\sqrt{x \frac{E_B}{E_{WD}}}} \tag{14}$$

III. SISTEM KELISTRIKAN PADA PT. PERTAMINA RU VII SYARIF KASIM

Pada PT. Pertamina RU VII Syaif kasim memiliki 4 buah generator yaitu 2 buah Generator Turbine Gas baru dengan kapasitas 2,25 MW dan 2 buah Diesel Engine Generator dengan kapasitas 1,2 MW. Pada kondisi saat ini, 2 buah Diesel Engine Generator diubah menjadi generator Emergency Power yang digunakan untuk backfeeding ke level tegangan 6 kV pada saat blackstart GTG melalui 2 buah trafo. Pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim dalam operasinya dilengkapi dengan beberapa peralatan seperti transformator, relay, circuit breaker yang digunakan untuk masing-masing beban dengan kategori tertentu. Sistem kelistrikan PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim ditunjukkan pada Gambar 1.

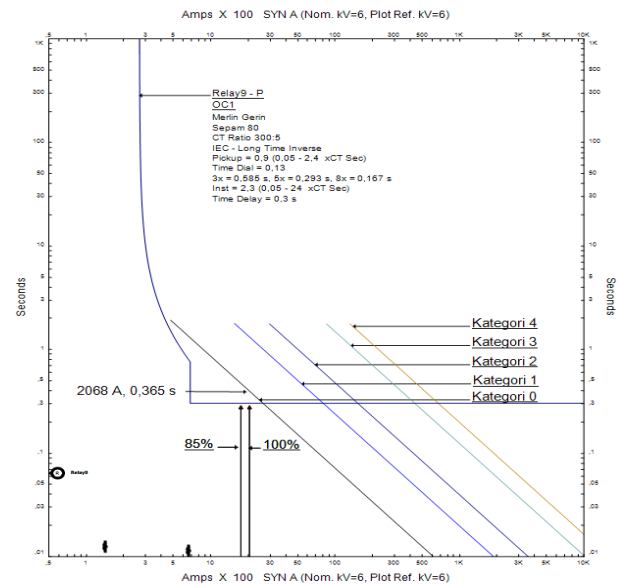
IV. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi

Analisa yang dilakukan kali ini adalah untuk mengetahui nilai dari energi insiden *arc flash*. Selain nilai energi insiden *arc flash*, dari analisa ini juga didapatkan nilai *arcing current*, *flash protection boundary*. Nilai-nilai tersebut digunakan sebagai dasar penentuan *Personal Protective Equipment* (PPE) yang harus digunakan pekerja ketika menangani gangguan dengan menggunakan standard NFPA 70E. Tabel 3 menunjukkan beberapa bus yang akan dianalisa dengan data arus gangguan *bolted* dan *fault clearing time*.

B. Perhitungan Menggunakan Standard IEEE 1584-2002

Berdasarkan data pada Tabel 3, maka dapat dicari arus arcing, energi normalisasi, energi insiden dan jarak kerja.



Gambar. 4 Kurva Rele 9 dengan kurva batas energi pada level tegangan 1-15 kV.

Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.

Salah satu contoh rincian perhitungan busur api pada bus SYN A dengan standard IEEE-1584-2002 sebagai berikut:

Perhitungan arus arcing (I_a):

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf}$$

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg (2,074)$$

$$I_a = 2,067 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log (2,067)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \log (2,067)+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 0,900 \frac{J}{cm^2}$$

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

$$= 4,184 \times 1 \times 0,900 \left(\frac{0,365}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident Energy = 4,657 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident Energy = 4,657/4,184$$

$$Incident Energy = 1,113 \text{ Cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas aman (D):

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

$$D_B = \sqrt{0,973 \left[4,184 \times 1 \times 0,900 \left(\frac{0,365}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right) \right]}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 0,900 \times 1,825 \times 102,6}$$

$$D_B = 845,82 \text{ mm} = 0,845 \text{ m}$$

C. Perhitungan Menggunakan Metode Kurva Batasan Energi

Pada perhitungan busur api menggunakan metode kurva batasan energi, hal yang harus dilakukan pertama kali adalah mendapatkan kurva garis setiap kategori PPE. Kurva ini menunjukkan hubungan arus – waktu yang didapatkan dari persamaan yang tetap mengacu pada IEEE 1584-2002. Pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim terdapat 2 level tegangan yang akan dianalisa yaitu pada level tegangan dibawah 1 kV dan level tegangan 1 – 15 kV.

1) Penentuan Kurva Batasan Energi Pada Level Tegangan < 1 kV

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

$$A_1 = 4,184 \frac{1,5}{0,2} \left(\frac{610^{1,473}}{610^{1,473}} \right)$$

$$A_1 = 31,38$$

$$A_2 = K_1 + K_2 + 0,0011 G$$

$$A_2 = -0,555 + 0 + (0,0011 \times 32)$$

$$A_2 = -0,5198$$

$$A'_2 = 10^{A_2}$$

$$A'_2 = 10^{-0,5198}$$

$$A'_2 = 0,30213428$$

Berdasarkan Tabel 4 70E-2015 untuk PPE kategori 0 nilai $E = 5,0208 \text{ J/cm}^2$, maka persamaannya

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{5,0208}{31,38 \times 0,30213428 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 0,5295 \times I_a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 1 nilai $E = 16,736 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{16,736}{31,38 \times 0,30213428 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 1,7652 \times I_a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 2 nilai $E = 33,472 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{33,472}{31,38 \times 0,30213428 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 3,5304 \times I_a^{1,081}$$

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

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{104,6}{31,38 \times 0,30213428 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 11,0326 \times I_a^{1,081}$$

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

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{167,36}{31,38 \times 0,30213428 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 17,6521 \times I_a^{1,081}$$

Dari persamaan hubungan arus terhadap waktu tersebut diubah menjadi kurva garis pada Gambar 2.

2) Penentuan Kurva Batasan Energi Pada Level Tegangan 1 – 15 kV

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

$$A_1 = 4,184 \frac{1}{0,2} \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$A_1 = 14,1755636$$

$$A_2 = K_1 + K_2 + 0,0011 G$$

$$A_2 = -0,555 + 0 + (0,0011 \times 153)$$

$$A_2 = -0,3867$$

$$A'_2 = 10^{A_2}$$

$$A'_2 = 10^{-0,3867}$$

$$A'_2 = 0,410488$$

Berdasarkan Tabel 4 70E-2015 untuk PPE kategori 0 nilai $E = 5,0208 \text{ J/cm}^2$, maka persamaannya

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{5,0208}{14,1755636 \times 0,410488 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 0,8628 \times I_a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 1 nilai $E = 16,736 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{16,736}{14,1755636 \times 0,410488 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 2,8761 \times I_a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 2 nilai $E = 33,472 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A_2 I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{33,472}{14,1755636 \times 0,410488 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 5,7519 \times I_a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 3 nilai $E = 104,6 \text{ J/cm}^2$ 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 $E = 167,36 \text{ J/cm}^2$ maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A_2 I_a^{1,081}}$$

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

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

Dari persamaan hubungan arus terhadap waktu tersebut diubah menjadi kurva garis pada Gambar 3.

3) Penentuan Jarak Batas Aman Perlindungan

Untuk switchgear dibawah 1 kV, perhitungan jarak aman batas perlindungan PPE kategori 0, $E_{WD} = 5,0208 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{610}{1,473 \sqrt{\frac{5,0208}{5,0208}}} = 0,610 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 1, $E_{WD} = 16,736 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{610}{1,473 \sqrt{\frac{5,0208}{16,736}}} = 1,381 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 2, $E_{WD} = 33,472 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{610}{1,473 \sqrt{\frac{5,0208}{33,472}}} = 2,211 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 3, $E_{WD} = 104,6 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{610}{1,473 \sqrt{\frac{5,0208}{104,6}}} = 4,793 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 4, $E_{WD} = 167,36 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{610}{1,473 \sqrt{\frac{5,0208}{167,36}}} = 6,595 \text{ meter}$$

Untuk switchgear 1-15 kV, perhitungan jarak aman batas perlindungan PPE kategori 0, $E_{WD} = 5,0208 \text{ J/cm}^2$:

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

Untuk PPE kategori 1, $E_{WD} = 16,736 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,0208}{16,736}}} = 3,136 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 2, $E_{WD} = 33,472 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,0208}{33,472}}} = 6,395 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 3, $E_{WD} = 104,6 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,0208}{104,6}}} = 20,625 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 4, $E_{WD} = 167,36 \text{ J/cm}^2$:

$$D_B = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,0208}{167,36}}} = 33,433 \text{ meter}$$

4) Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Pada Bus SYN A

Pada bus SYN A, rele yang digunakan sebagai referensi kurva batasan energi adalah rele 9 untuk mengamankan gangguan yang muncul pada bus ini (Gambar 4). Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus SYN A dapat dilihat pada Gambar 4.

Pada bus SYN A dengan tegangan bus sebesar 6 kV digunakan kurva batasan energi 1-15 kV. Pada plotting kurva Gambar 5, terlihat bahwa kurva rele sebagian besar berada dibawah kurva batas kategori 0. Kemudian, dilakukan pengecekan untuk nilai 85% hingga 100% arus arc. Didapatkan kondisi maksimum dengan nilai arus maksimum 100% sebesar 2,068 kA dan berlangsung selama 0,365 detik. Sehingga, kategori PPE yang harus digunakan adalah PPE kategori 0 dikarenakan gangguan tersebut berada dibawah kurva batas kategori 0 dengan jarak batas aman adalah 0,910 meter.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi, perhitungan dan analisis data yang telah dilakukan pada tugas akhir, maka dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu: (1) Penggunaan metode kurva batasan energi dapat mempersingkat waktu perhitungan analisa busur api untuk penentuan kategori PPE pada sistem kelistrikan yang terdapat banyak bus. (2) Hasil perhitungan manual dengan metode IEEE 1584-2002 dan metode kurva batasan energi yang telah dilakukan, didapatkan hasil kategori PPE pada tiap metode menunjukkan hasil yang sama, sehingga metode kurva batasan energi dapat menentukan kategori PPE dengan tepat. (3) Terdapat perbedaan hasil perhitungan jarak batas aman antara metode IEEE 1584-2002 dengan metode kurva batasan energi, dikarenakan metode kurva batasan energi tidak

memperhitungkan nilai energi insiden dan fault clearing time pada tiap bus. Nilai jarak aman yang diberikan untuk metode kurva batasan energi adalah nilai maksimal dari masing-masing kategori yang telah ditentukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Situngkir, A. Priyadi, and M. Pujiantara, "Analisa arc flash pada sistem tegangan menengah di PT. Semen Padang dengan menggunakan metode perhitungan yang dimodifikasi," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. B257--B264, 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.16167.
- [2] A. C. Parsons, W. B. Leuschner, and K. X. Jiang, "Simplified arc-flash hazard analysis using energy boundary curves," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 6, pp. 1879–1885, 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.2006310.
- [3] M. Zeller and G. Scheer, "Add Trip Security to Arc-Flash Detection for Safety and Reliability," in *2009 Power Systems Conference*, 2009, pp. 1–8. doi: 10.1109/PSAMP.2009.5262324.