

BAB IV

ANALISIS DATA

Pabrik Gula Kebonagung memiliki dua sumber listrik, yaitu jala – jala PLN dan tiga buah generator. Pada penelitian ini analisis dilakukan dengan sumber listrik jala – jala PLN.

Jala – jala PLN dengan kapasitas sebesar 2.180 kVA disalurkan ke pabrik melalui dua buah transformator *step – down* yang terhubung secara paralel dengan rating tegangan 20 kV/380 V. Di seluruh pabrik, sistem instalasi yang terpasang adalah sistem tegangan rendah 380 V dengan menggunakan sistem distribusi radial. Aliran daya dari transformator disalurkan langsung menuju *busbar* dan disebarkan menuju panel – panel listrik dan *motor control center* (MCC) yang terdapat di seluruh stasiun.

Daerah proteksi busur listrik dibagi menjadi tiga bagian sesuai dengan penggunaan *circuit breaker* yang terkoordinasi pada pabrik. Daerah proteksi satu merupakan daerah proteksi *circuit breaker* ketika terjadi gangguan di panel listrik atau MCC. Daerah proteksi satu meliputi seluruh peralatan instalasi pada Stasiun Listrik, Ketel, Gilingan, Tengah, dan Puteran. Daerah proteksi dua merupakan daerah proteksi *circuit breaker* ketika terjadi gangguan pada hulu peralatan yang dilindungi oleh *circuit breaker* Panel Sentral. Daerah proteksi tiga merupakan daerah proteksi *circuit breaker* ketika terjadi gangguan di antara Panel Sentral dan transformator PLN.

4.1 Analisis Hubung Singkat

Analisis hubung singkat yang digunakan adalah analisis hubung singkat tiga fasa guna menentukan nilai *bolted fault current* atau nilai arus hubung singkat yang paling besar pada sistem instalasi. Setelah dilakukan perhitungan *bolted fault current* (I_{sc}) maka dengan menggunakan persamaan yang ditetapkan oleh standard IEEE 1584 dapat ditentukan *arcing fault current* (I_a) atau arus busur listrik pada setiap peralatan. Perhitungan I_{sc} dan I_a dilakukan pada seluruh stasiun.

4.1.1 Analisis Hubung Singkat Daerah Proteksi Satu

Analisis hubung singkat pada daerah proteksi satu meliputi seluruh peralatan instalasi pada setiap stasiun dengan memperhitungkan impedansi total dari transformator paralel hingga peralatan. Perhitungan dimulai dari panel listrik Penerangan.

Untuk melakukan analisis hubung singkat pada Penerangan, data – data yang digunakan pada adalah data transformator PLN sebagai berikut:

$$S_T = 1.650 \text{ kVA}$$

$$V_{L-L} = 2 \text{ kV}/380 \text{ V}$$

$$V_{sc} = 6,65 \%$$

Keterangan:

$$S_T = \text{Daya transformator}$$

$$V_{L-L} = \text{Tegangan antar saluran transformator}$$

$$V_{sc} = \text{Persentase tegangan hubung singkat transformator}$$

Data – data tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan 2.8 untuk menentukan impedansi transformator (Z_T).

$$\begin{aligned} Z_T &= \frac{V_{sc} (\%) V_{L-L}^2}{100 S_T} \\ &= \frac{6,65}{100} \frac{380^2}{1650 \times 10^3} \\ &= 5,82 \times 10^{-3} \Omega \end{aligned}$$

Untuk menghitung I_{sc} pada Panel Sentral maka harus dihitung impedansi total dari trafo hingga titik gangguan. Karena trafo terhubung paralel dan identik maka:

$$\begin{aligned} Z_{2T} &= \frac{Z_T}{2} \\ &= \frac{5,82 \times 10^{-3}}{2} \\ &= 2,91 \times 10^{-3} \Omega \end{aligned}$$

Selanjutnya untuk menghitung impedansi total dari transformator menuju titik gangguan di panel Penerangan diperlukan data busbar berupa panjang busbar (l_{bb}) dari transformator hingga titik gangguan.

$$l_{bb} = 2 \times 100 \text{ mm}, 2 \times 100 \text{ mm}, 2 \times 120 \text{ mm}, 185 \text{ mm}$$

Menurut Christophe Preve pada "*Protection of Electrical Networks*" yang diterbitkan oleh ISTE Ltd. umumnya impedansi busbar bernilai $0,15 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$. Sehingga impedansi busbar pada unit Penerangan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Impedansi busbar } (Z_{bb}) &= 0,15 \times 10^{-3} \times [(2 \times 0,1) + (2 \times 0,1) + (2 \times 0,12) + \\ & \quad 0,185] \\ &= 12,375 \times 10^{-5} \Omega. \end{aligned}$$

Dengan diketahuinya impedansi busbar, maka dapat dihitung impedansi total unit Penerangan (Z) adalah:

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_{2T} + Z_{bb} \\
 &= (2,91 \times 10^{-3}) + (12,375 \times 10^{-5}) \\
 &= 3,034 \times 10^{-3} \Omega
 \end{aligned}$$

Setelah Z diketahui, maka sesuai dengan persamaan 2.3 I_{sc} dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_{sc} &= \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3} Z} \\
 &= \frac{380}{\sqrt{3} \times 3,034 \times 10^{-3}} \\
 &= 72.315,41 \text{ A} \\
 &= 72,32 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan I_a dengan memasukkan I_{sc} pada persamaan 2.22 yang merujuk pada standard IEEE 1584. Parameter lain untuk menghitung I_a adalah konstanta K yang bernilai -0,097 untuk peralatan dengan konfigurasi tertutup, tegangan sistem U_n , dan celah antar konduktor atau *gap* (G) yang menurut IEEE 1584 bernilai 25 mm untuk *panel board* sesuai dengan Tabel 2.3.

$$\begin{aligned}
 \log I_a &= K + 0,662 (\log I_{sc}) + 0,0966 (V_{L-L}) + 0,000526 (G) + 0,5588 (V_{L-L}) (\log I_{sc}) - 0,00304 (G) (\log I_{sc}) \\
 &= -0,097 + 0,662 (\log 72,32) + 0,0966 (0,38) + 0,000526 (25) + 0,5588 (0,38) (\log 72,32) - 0,00304 (25) (\log 72,32) \\
 &= 1,437 \\
 I_a &= \log^{-1} (1,437) \\
 &= 27,36 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan selanjutnya dilakukan dengan menggunakan metode yang sama ditunjukkan pada Lampiran 2 dan hasilnya ditabelkan untuk mempermudah proses perhitungan selanjutnya pada Tabel 4.1 hingga Tabel 4.5.

4.1.2 Analisis Hubung Singkat Daerah Proteksi Dua

Analisis hubung singkat pada daerah proteksi dua meliputi seluruh peralatan instalasi pada setiap stasiun dengan memperhitungkan impedansi total dari transformator paralel hingga hulu peralatan. Perhitungan dimulai dari panel listrik Penerangan.

Untuk menghitung I_{sc} pada Panel Sentral maka harus dihitung impedansi total dari trafo hingga titik gangguan. Karena trafo terhubung paralel dan identik maka:

$$Z_{2T} = \frac{Z_T}{2}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{5,82 \times 10^{-3}}{2} \\
 &= 2,91 \times 10^{-3} \Omega
 \end{aligned}$$

Selanjutnya untuk menghitung impedansi total dari transformator menuju titik gangguan di panel Penerangan diperlukan data busbar berupa panjang busbar (l_{bb}) dari transformator hingga titik gangguan.

$$l_{bb} = 2 \times 100 \text{ mm}, 2 \times 100 \text{ mm}.$$

Menurut Christophe Preve pada "*Protection of Electrical Networks*" yang diterbitkan oleh ISTE Ltd. umumnya impedansi busbar bernilai $0,15 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$. Sehingga impedansi busbar pada unit Penerangan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Impedansi busbar } (Z_{bb}) &= 0,15 \times 10^{-3} \times [(2 \times 0,1) + (2 \times 0,1)] \\
 &= 6 \times 10^{-5} \Omega.
 \end{aligned}$$

Dengan diketahuinya impedansi busbar, maka dapat dihitung impedansi total unit Penerangan (Z) adalah:

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_{2T} + Z_{bb} \\
 &= (2,91 \times 10^{-3}) + (6 \times 10^{-5}) \\
 &= 2,97 \times 10^{-3} \Omega
 \end{aligned}$$

Setelah Z diketahui, maka sesuai dengan persamaan 2.3 I_{sc} dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_{sc} &= \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3} Z} \\
 &= \frac{380}{\sqrt{3} \times 2,97 \times 10^{-3}} \\
 &= 73.867,63 \text{ A} \\
 &= 73,87 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan I_a dengan memasukkan I_{sc} pada persamaan 2.22 yang merujuk pada standard IEEE 1584. Parameter lain untuk menghitung I_a adalah konstanta K yang bernilai -0,097 untuk peralatan dengan konfigurasi tertutup, tegangan sistem U_n , dan celah antar konduktor atau *gap* (G) yang menurut IEEE 1584 bernilai 32 mm untuk *low voltage switchgear* sesuai dengan Tabel 2.3.

$$\begin{aligned}
 \log I_a &= K + 0,662 (\log I_{sc}) + 0,0966 (V_{L-L}) + 0,000526 (G) + 0,5588 (V_{L-L}) (\log I_{sc}) - 0,00304 (G) (\log I_{sc}) \\
 &= -0,097 + 0,662 (\log 73,87) + 0,0966 (0,38) + 0,000526 (32) + 0,5588 (0,38) (\log 73,87) - 0,00304 (32) (\log 73,87) \\
 &= 1,408
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_a &= \log^{-1}(1,408) \\ &= 25,61 \text{ kA} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan selanjutnya dilakukan dengan menggunakan metode yang sama ditunjukkan pada Lampiran 2 dan hasilnya ditabelkan untuk mempermudah proses perhitungan selanjutnya pada Tabel 4.1 hingga Tabel 4.5.

4.1.3 Analisis Hubung Singkat Daerah Proteksi Tiga

Analisis hubung singkat pada daerah proteksi tiga meliputi seluruh peralatan instalasi pada setiap stasiun dengan memperhitungkan impedansi total dari transformator paralel. Perhitungan dimulai dari panel listrik Penerangan.

Untuk menghitung I_{sc} pada Panel Sentral maka harus dihitung impedansi paralel transformator yaitu:

$$\begin{aligned} Z_{2T} &= \frac{Z_T}{2} \\ &= \frac{5,82 \times 10^{-3}}{2} \\ &= 2,91 \times 10^{-3} \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{sc} &= \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3} Z_{2T}} \\ &= \frac{380}{\sqrt{3} \times 2,91 \times 10^{-3}} \\ &= 75.390,68 \text{ A} \\ &= 75,39 \text{ kA} \end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan I_a dengan memasukkan I_{sc} pada persamaan 2.22 yang merujuk pada standard IEEE 1584. Parameter lain untuk menghitung I_a adalah konstanta K yang bernilai -0,097 untuk peralatan dengan konfigurasi tertutup, tegangan sistem U_n , dan celah antar konduktor atau *gap* (G) yang menurut IEEE 1584 bernilai 32 mm untuk *low voltage switchgear* sesuai dengan Tabel 2.3.

$$\begin{aligned} \log I_a &= K + 0,662 (\log I_{sc}) + 0,0966 (V_{L-L}) + 0,000526 (G) + 0,5588 (V_{L-L}) (\log I_{sc}) \\ &\quad - 0,00304 (G) (\log I_{sc}) \\ &= -0,097 + 0,662 (\log 75,39) + 0,0966 (0,38) + 0,000526 (32) + 0,5588 \\ &\quad (0,38) (\log 75,39) - 0,00304 (32) (\log 75,39) \\ &= 1,415 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_a &= \log^{-1}(1,415) \\ &= 26,02 \text{ kA} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan selanjutnya dilakukan dengan menggunakan metode yang sama ditunjukkan pada Lampiran 2 dan hasilnya ditabelkan untuk mempermudah proses perhitungan selanjutnya pada Tabel 4.1 hingga Tabel 4.5.

4.2 Pengelompokan Peralatan

Peralatan dikelompokkan sesuai dengan stasiun masing – masing. Tabel pengelompokkan meliputi:

- 1) Identitas peralatan
- 2) Kelas peralatan

Pabrik PT. KEBON AGUNG memiliki kelas peralatan bertegangan rendah, yaitu *low voltage switchgear*, *panel board*, dan *low voltage MCC*.

- 3) *Gap* (G)

Gap merupakan celah antar konduktor pada panel peralatan yang menurut standard IEEE 1584 pada Tabel 2.3 bernilai 32 mm untuk kelas peralatan *low voltage switchgear* dan 25 mm untuk *panel board* dan *low voltage MCC*. Pada pengelompokkan ini diasumsikan instalasi peralatan telah memenuhi standard IEEE.

- 4) Jarak insiden (D)

Jarak insiden merupakan jarak seorang pekerja dapat terpapar energi busur listrik dari sumbernya. Menurut standard IEEE pada Tabel 2.4 jarak insiden untuk kelas peralatan *low voltage switchgear* adalah 24" atau 609,6 mm dan untuk *Panel Board* dan *Low Voltage MCC* adalah 18" atau 457,3 mm. Pada pengelompokkan ini diasumsikan instalasi peralatan telah memenuhi standard IEEE.

- 5) Eksponen jarak insiden (x)

Eksponen jarak insiden ditentukan merujuk standard IEEE 1584 pada Tabel 2.5. Untuk kelas peralatan *low voltage switchgear* bernilai 1,473 dan untuk *panel board* dan *low voltage MCC* bernilai 1,641. Pada pengelompokkan ini diasumsikan instalasi peralatan telah memenuhi standard IEEE.

- 6) *Arc fault current* (I_a)

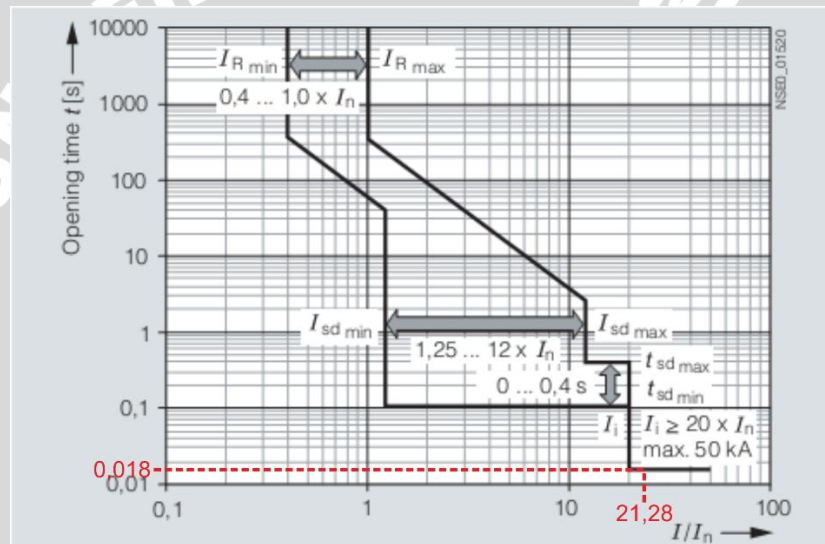
I_a didapatkan dari perhitungan pada analisis hubung singkat yang telah dilakukan sebelumnya.

7) Arus nominal *circuit breaker* (I_n)

Arus nominal *circuit breaker* pada masing – masing peralatan didapatkan dari data pembebanan dari PT. KEBON AGUNG Kota Malang yang ditunjukkan pada Lampiran 2.

8) Waktu pemutusan gangguan *circuit breaker* (t)

Waktu pemutusan gangguan *circuit breaker* didapatkan dari *manual book* atau *data sheet* dari masing – masing tipe *circuit breaker*. Data yang diperlukan adalah kurva karakteristik waktu – arus yang dimiliki oleh *circuit breaker* tersebut. Gambar 4.1 merupakan kurva karakteristik waktu – arus pada MCC 4 yang menggunakan *circuit breaker* berjenis Siemens 3WL ETU25B.



Gambar 4.1 Kurva Karakteristik Waktu – Arus ACB Siemens 3WL ETU25B

Sumber: Siemens AG, 2011.

Pada Gambar 4.1 sumbu x merupakan perbandingan arus yang mengalir pada *circuit breaker* terhadap arus nominal (I/I_n) dan sumbu y merupakan waktu pemutusan gangguan *circuit breaker*. Sehingga apabila $I_a = 42,70$ kA dan $I_n = 1250$ A maka:

$$\begin{aligned} I/I_n &= \frac{42,70 \times 10^3}{1250} \\ &= 21,28 \end{aligned}$$

Sehingga apabila ditarik garis berwarna merah sejajar dengan sumbu y maka garis akan berpotongan dengan garis daerah *instantaneous trip* pada *circuit breaker*. Selanjutnya garis merah diteruskan sejajar dengan sumbu x hingga menyentuh sumbu ordinat dan dapat diketahui bahwa waktu pemutusan

gangguan adalah sebesar 0,018 detik. Pada daerah proteksi dua dan tiga, waktu pemutusan gangguan merupakan penjumlahan dari *circuit breaker* yang berkoordinasi.

4.2.1 Daerah Proteksi Satu

Kelas peralatan pada daerah proteksi satu adalah *panel board* dan *low voltage MCC* sehingga dapat ditentukan nilai G, D, dan x sesuai dengan standard IEEE 1584.

4.2.1.1 Stasiun Listrik

Stasiun Listrik terdiri dari unit Penerangan, Limbah, Timbangan dan Gilingan, Besali, dan Pendingin Turbin. Kelas peralatan Penerangan adalah *panel board* dan peralatan lainnya memiliki kelas *low voltage MCC*.

Circuit breaker yang digunakan pada Stasiun Listrik adalah sebagai berikut:

- 1) Penerangan : Merlin Gerin *Air Circuit Breaker* tipe NW12H1
- 2) Limbah : Siemens *Air Circuit Breaker* tipe ETU25B
- 3) Timbangan : Schneider Electric MCCB tipe EZC 250 B
- 4) Besali : Schneider Electric MCCB tipe EZC 250 B
- 5) Pendingin Turbin: Siemens *Air Circuit Breaker* tipe ETU25B

Waktu pemutusan gangguan (t) dapat ditentukan melalui kurva karakteristik waktu – arus. Pengelompokan peralatan pada Stasiun Listrik ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kelompok Peralatan Daerah Proteksi Satu – Stasiun Listrik

No.	Peralatan	Kelas	G (mm)	D (mm)	x	I _a (kA)	I _n (A)	t (s)
1.	Penerangan	<i>Panel Board</i>	25	457,2	1,641	27,36	1250	0,08
2.	Limbah + Base In + Tetes	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,56	1000	0,018
3.	Timbangan + Gil Contoh	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,80	200	0,02
4.	Besali	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,40	400	0,02
5.	Pendingin Turbin	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,54	800	0,018

4.2.1.2 Stasiun Ketel

Stasiun Ketel terdiri dari peralatan Yosh 1, Yosh 2, Jiang Xi, WTP, MCC 6A, Reclaimer, dan ESP. Kelas peralatan pada seluruh peralatan di Stasiun Ketel adalah *low voltage MCC*.

Circuit breaker yang digunakan pada Stasiun Ketel adalah sebagai berikut:

- 1) Yosh 1 : General Electric *Air Circuit Breaker* tipe MS31F25
- 2) Yosh 2 : General Electric *Air Circuit Breaker* tipe MS31F25
- 3) Jiang Xi : Merlin Gerin *Air Circuit Breaker* tipe NW32H1
- 4) MCC 6A : Siemens *Air Circuit Breaker* tipe ETU25B
- 5) Reclaimer : Siemens *Air Circuit Breaker* tipe ETU25B
- 6) ESP : Siemens *Air Circuit Breaker* tipe ETU25B

Waktu pemutusan gangguan (t) dapat ditentukan melalui kurva karakteristik waktu – arus. Pengelompokan peralatan pada Stasiun Ketel ditunjukkan Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Kelompok Peralatan Daerah Proteksi Satu – Stasiun Ketel

No.	Peralatan	Kelas	G (mm)	D (mm)	x	I _a (kA)	I _n (A)	t (s)
1.	Yosh 1	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	26,94	2000	0,06
2.	Yosh 2	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	26,76	2500	0,06
3.	Jiang Xi	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,76	3200	0,07
4.	WTP	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,56	800	0,018
5.	MCC 6A	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,30	1250	0,018
6.	Reclaimer	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,83	600	0,018
7.	ESP	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,12	1250	0,018

4.2.1.3 Stasiun Gilingan

Stasiun Gilingan terdiri dari peralatan MCC 4, MCC 5, dan Crane. Kelas peralatan pada seluruh peralatan di Stasiun Gilingan adalah *low voltage* MCC.

Circuit breaker yang digunakan pada Stasiun Gilingan pada seluruh peralatan adalah Siemens *Air Circuit Breaker* tipe ETU25B. Dengan metode yang sama seperti pada stasiun – stasiun sebelumnya, maka waktu pemutusan gangguan (t) dapat ditentukan melalui kurva karakteristik waktu – arus. Pengelompokan peralatan pada Stasiun Gilingan ditunjukkan Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Kelompok Peralatan Daerah Proteksi Satu – Stasiun Gilingan

No.	Peralatan	Kelas	G (mm)	D (mm)	x	I _a (kA)	I _n (A)	t (s)
1.	MCC 4	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,05	1250	0,018
2.	MCC 5	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,30	600	0,018
3.	Crane	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,56	800	0,018

4.2.1.4 Stasiun Tengah

Stasiun Tengah terdiri dari peralatan DB 13, Cultrox + CVP, Vacuum Robusi, Grup 6, RVF, Single Tray Baru, Grup 4, Grup 5, MCC 8, DB 11, Single Tray, dan Injeksi Baru . Kelas peralatan pada seluruh peralatan di Stasiun Tengah adalah *low voltage* MCC.

Circuit breaker yang digunakan pada Stasiun Tengah pada seluruh peralatan adalah Siemens *Air Circuit Breaker* tipe ETU25B. Waktu pemutusan gangguan (t) dapat ditentukan melalui kurva karakteristik waktu – arus. Pengelompokan peralatan pada Stasiun Tengah ditunjukkan Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Kelompok Peralatan Daerah Proteksi Satu – Stasiun Tengah

No.	Bus	Kelas	G (mm)	D (mm)	x	I _a (kA)	I _n (A)	t (s)
1.	DB 13	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,30	1000	0,018
2.	Cultrox + CVP	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,30	1250	0,018
3.	Vacuum Robusi	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,23	1000	0,018
4.	Grup 6	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	26,80	2000	0,4
5.	RVF	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,30	1250	0,018
6.	Single Tray Baru	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,56	600	0,018
7.	Grup 4	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	26,80	1250	0,018
8.	Grup 5	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,05	1250	0,018
9.	MCC 8	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	26,70	2500	0,4
10.	DB 11	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,30	1250	0,018
11.	Single Tray	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,30	1000	0,015
12.	Injeksi Baru	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,26	1250	0,015

4.2.1.5 Stasiun Puteran

Stasiun Puteran terdiri dari peralatan Broad Bent I (BB I), Grup 2, Grup 3, DB 12, Grup 1, Grup X, dan Grup IX. Kelas peralatan pada seluruh peralatan di Stasiun Tengah adalah *low voltage* MCC.

Circuit breaker yang digunakan pada Stasiun Puteran pada seluruh peralatan adalah Siemens *Air Circuit Breaker* tipe ETU25B. Dengan metode yang sama seperti pada stasiun – stasiun sebelumnya, maka waktu pemutusan gangguan (t) dapat ditentukan melalui kurva karakteristik waktu – arus. Pengelompokan peralatan pada Panel Induk ditunjukkan Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Kelompok Peralatan Daerah Proteksi Satu – Stasiun Puteran

No.	Bus	Kelas	G (mm)	D (mm)	x	I _a (kA)	I _n (A)	t (s)
1.	Broad Bent I (BBI)	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,26	1250	0,018
2.	Grup 2	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,20	1000	0,018
3.	Grup 3	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,20	1000	0,018
4.	DB 12 (BBII + WSIV)	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,16	1250	0,018
5.	Grup 1 (Conti 1,2,3)	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,52	1250	0,018
6.	Grup X (BBIII Disconti 6)	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,26	1250	0,018
7.	Grup IX (Conti 12,13,14)	<i>Low-V MCC</i>	25	457,2	1,641	27,26	1250	0,018

4.2.2 Daerah Proteksi Dua

Kelas peralatan pada daerah proteksi dua atau Panel Sentral adalah *low voltage switchgear*. *Circuit breaker* yang digunakan adalah Merlin Gerin *Air Circuit Breaker* tipe NW32H1. Waktu pemutusan gangguan (t) adalah penjumlahan dari t CB Panel Sentral dengan t CB masing – masing peralatan. Kelompok peralatan daerah proteksi dua ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Kelompok Peralatan Daerah Proteksi Dua

No.	Peralatan	Kelas	G (mm)	D (mm)	x	I _a (kA)	I _n (A)	t (s)
1.	Penerangan	<i>Panel Board</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,16
2.	Limbah + <i>Base In</i> + Tetes	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1000	0,098
3.	Timbangan + Gil Contoh	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	200	0,1
4.	Besali	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	400	0,1
5.	Pendingin Turbin	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	800	0,098
6.	Yosh 1	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,51	2000	0,14
7.	Yosh 2	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	24,65	2500	0,28
8.	Jiang Xi	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	3200	0,15
9.	WTP	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	800	0,098
10.	MCC 6A	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,098
11.	Reclaimer	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	600	0,098
12.	ESP	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,51	1250	0,098
13.	MCC 4	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,098
14.	MCC 5	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	600	0,098

Lanjutan Tabel 4.6

15.	Crane	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	800	0,098
16.	DB 13	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1000	0,098
17.	Cultrox + CVP	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,098
18.	Vacuum Robusi	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1000	0,098
19.	Grup 6	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	2000	0,48
20.	RVF	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,098
21.	Single Tray Baru	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	600	0,098
22.	Grup 4	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,098
23.	Grup 5	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,098
24.	MCC 8	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,51	2500	0,48
25.	DB 11	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,098
26.	Single Tray	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1000	0,098
27.	Injeksi Baru	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,82	1250	0,098
28.	Broad Bent I (BBI)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,82	1250	0,098
29.	Grup 2	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1000	0,098
30.	Grup 3	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1000	0,098
31.	DB 12 (BBII + WSIV)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,61	1250	0,098
32.	Grup 1 (Conti 1,2,3)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,82	1250	0,098
33.	Grup X (BBIII Disconti 6)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,82	1250	0,098
34.	Grup IX (Conti 12,13,14)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	25,82	1250	0,098

4.2.3 Daerah Proteksi Tiga

Kelas peralatan pada daerah proteksi dua atau PLN Trafo 1 dan 2 adalah *low voltage switchgear*. *Circuit breaker* yang digunakan adalah Terasaki Electric Air Circuit Breaker tipe AT 25. Waktu pemutusan gangguan (t) adalah penjumlahan dari t CB trafo, t CB Panel Sentral dengan t CB masing – masing peralatan. Kelompok peralatan daerah proteksi tiga ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kelompok Peralatan Daerah Proteksi Tiga

No.	Peralatan	Kelas	G (mm)	D (mm)	x	I _a (kA)	I _n (A)	t (s)
1.	Penerangan	<i>Panel Board</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,21
2.	Limbah + <i>Base In</i> + Tetes	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1000	0,148
3.	Timbangan + Gil Contoh	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	200	0,15

Lanjutan Tabel 4.7

4.	Besali	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	400	0,15
5.	Pendingin Turbin	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	800	0,148
6.	Yosh 1	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	2000	0,19
7.	Yosh 2	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	2500	0,33
8.	Jiang Xi	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	3200	0,2
9.	WTP	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	800	0,148
10.	MCC 6A	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
11.	Reclaimer	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	600	0,148
12.	ESP	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
13.	MCC 4	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
14.	MCC 5	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	600	0,148
15.	Crane	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	800	0,148
16.	DB 13	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1000	0,148
17.	Cultrox + CVP	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
18.	Vacuum Robusi	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1000	0,148
19.	Grup 6	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	2000	0,53
20.	RVF	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
21.	Single Tray Baru	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	600	0,148
22.	Grup 4	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
23.	Grup 5	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
24.	MCC 8	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	2500	0,53
25.	DB 11	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
26.	Single Tray	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1000	0,148
27.	Injeksi Baru	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
28.	Broad Bent I (BBI)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
29.	Grup 2	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1000	0,148
30.	Grup 3	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1000	0,148
31.	DB 12 (BBII + WSIV)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
32.	Grup 1 (Conti 1,2,3)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
33.	Grup X (BBIII Disconti 6)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148
34.	Grup IX (Conti 12,13,14)	<i>Low-V MCC</i>	32	609,6	1,473	26,02	1250	0,148

4.3 Perhitungan Energi Insiden

Berdasarkan persamaan 2.25 yang merujuk pada standard IEEE 1584, maka besar energi insiden normal (E_n) tanpa pengaruh jarak dan waktu pemutusan gangguan adalah:

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

Seluruh peralatan yang terpasang pada panel listrik memiliki konfigurasi tertutup dan sistem diketanahkan, sehingga menurut IEEE 1584, $K_1 = -0,555$ dan $K_2 = 0$. *Arc fault current* (I_a) dan *Gap* (G) merujuk pada Tabel 4.1 – 4.6 untuk dilakukan analisis energi insiden normal pada setiap peralatan di masing – masing stasiun.

Setelah dilakukan perhitungan terhadap E_n , maka energi insiden busur listrik (E) dapat dihitung dengan persamaan 2.26 yang merujuk pada standard IEEE 1584, yaitu:

$$E_{ins} = C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610}{D}\right)^x$$

Sistem instalasi pada pabrik PT. KEBON AGUNG Kota Malang memiliki level tegangan 380 V yang kurang dari 1 kV, sehingga menurut standard IEEE 1584 $C_f = 1,5$. Waktu pemutusan (t), jarak insiden (D), dan eksponen jarak (x) merujuk pada Tabel 4.1 – 4.6 untuk dilakukan analisis energi insiden busur listrik pada setiap peralatan di masing – masing stasiun.

4.3.1 Energi Insiden Daerah Proteksi Satu

Analisis energi insiden dilakukan pada Penerangan terlebih dahulu dengan *arc fault current* (I_a) sebesar 27,36 A dan *gap* (G) sebesar 25 mm yang mengacu pada standard IEEE 1584, maka:

$$\begin{aligned} E_n &= I_a^{1,081} \times 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011G)} \\ &= 27,36^{0,81} \times 10^{[-0,555 + 0 + (0,0011 \times 25)]} \\ &= 10,62 \text{ J/cm}^2 \end{aligned}$$

Setelah E_n diketahui, maka energi insiden busur listrik (E_{ins}) dapat dihitung dengan memasukkan parameter $C_f = 1,5$, $t = 0,08$ s, $D = 457,2$ mm, dan $x = 1,641$ pada persamaan 2.26, sehingga:

$$\begin{aligned} E_{ins} &= C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610}{D}\right)^x \\ &= 1,5 \times 10,62 \times \left(\frac{0,08}{0,2}\right) \times \left(\frac{610}{457,2}\right)^{1,641} \\ &= 10,23 \text{ J/cm}^2 \end{aligned}$$

Satuan energi busur listrik adalah cal/cm^2 , sehingga dilakukan konversi dari J/cm^2 ke cal/cm^2 .

$$5 \text{ J/cm}^2 = 1,2 \text{ cal/cm}^2$$

$$1 \text{ J/cm}^2 = 0,24 \text{ cal/cm}^2$$

Maka:

$$E_{ins} = 10,23 \text{ J/cm}^2$$

$$= 10,23 \text{ J/cm}^2 \times 0,24 \frac{\text{cal/cm}^2}{\text{J/cm}^2}$$

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

Untuk perhitungan selanjutnya dilakukan dengan menggunakan metode yang sama yang ditunjukkan pada Lampiran 2 dan hasilnya ditabelkan untuk mempermudah proses perhitungan selanjutnya. Kategori bahaya ditentukan melalui standard yang diberikan oleh NFPA 70E. Hasil perhitungan energi insiden dan penentuan kategori bahaya ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Energi Insiden dan Kategori Bahaya Daerah Proteksi Satu

No.	Peralatan	E _n (J/cm ²)	E _{ins}		Kategori Bahaya
			(J/cm ²)	(cal/cm ²)	
1.	Penerangan	10,62	10,23	2,45	1
2.	Limbah + Base In + Tetes	10,70	2,32	0,56	0
3.	Timbangan + Gil Contoh	10,80	2,60	0,62	0
4.	Besali	10,70	2,58	0,62	0
5.	Pendingin Turbin	10,69	2,32	0,56	0
6.	Yosh 1	10,44	7,54	1,81	1
7.	Yosh 2	10,36	7,49	1,80	1
8.	Jiang Xi	10,44	8,80	2,11	1
9.	WTP	10,70	2,32	0,56	0
10.	MCC 6A	10,59	2,30	0,55	0
11.	Reclamer	10,44	2,26	0,54	0
12.	ESP	10,52	2,28	0,55	0
13.	MCC 4	10,49	2,27	0,55	0
14.	MCC 5	10,59	2,30	0,55	0
15.	Crane	10,70	2,32	0,56	0
16.	DB 13	10,59	2,30	0,55	0
17.	Cultrox + CVP	10,59	2,30	0,55	0
18.	Vacuum Robusi	10,56	2,29	0,55	0
19.	Grup 6	10,38	49,99	12	3
20.	RVF	10,59	2,30	0,55	0
21.	Single Tray Baru	10,70	2,32	0,56	0
22.	Grup 4	10,38	2,25	0,54	0
23.	Grup 5	10,49	2,27	0,55	0
24.	MCC 8	10,34	49,79	11,95	3
25.	DB 11	10,59	2,30	0,55	0
26.	Single Tray	10,59	2,30	0,55	0
27.	Injeksi Baru	10,58	2,29	0,55	0
28.	Broad Bent I (BBI)	10,58	2,29	0,55	0

Lanjutan Tabel 4.8

29.	Grup 2	10,55	2,29	0,55	0
30.	Grup 3	10,55	2,29	0,55	0
31.	DB 12 (BBII + WSIV)	10,54	2,28	0,55	0
32.	Grup 1 (Conti 1,2,3)	10,68	2,32	0,56	0
33.	Grup X (BBIII Disconti 6)	10,58	2,29	0,55	0
34.	Grup IX (Conti 12,13,14)	10,58	2,29	0,55	0

Berdasarkan Tabel 4.8 kategori bahaya yang terdapat pada daerah proteksi satu yaitu kategori 3 pada Grup 6 dan MCC 8 di Stasiun Tengah, kategori 1 pada Penerangan, Yosh 1, Yosh 2 dan Jiang Xi di Stasiun Listrik, dan kategori 0 pada peralatan lainnya.

Kategori bahaya 3 merupakan kategori bahaya tingkat tinggi yang dapat menyebabkan luka bakar yang stadium tiga sehingga dapat menyebabkan pembekuan pembuluh darah dan luka bakar serius pada seluruh lapisan kulit, yaitu epidermis, dermis dan hipodermis. Efek luka bakar tersebut adalah otot pada luka bakar akan mengalami mati rasa dan jaringan di bawah kulit akan mengalami kerusakan yang parah sehingga tidak dapat diobati.

Kategori bahaya 3 terjadi pada Grup 6 dan MCC 8 yang memiliki rating arus nominal sebesar 2000 dan 2500 A yang menggunakan *circuit breaker* Siemens 3WL tipe ETU25B. Perbandingan I_a/I_n keduanya terletak pada daerah *short time delay trip* sehingga waktu yang dibutuhkan *circuit breaker* untuk memutuskan arus gangguan cukup lama yaitu 0,1 – 0,4 detik. Dengan pengaturan waktu *delay* 0,4 detik pada kedua *circuit breaker*, maka didapatkan energi insiden yang besar yang berakibat pada tingginya resiko bahaya busur listrik pada kedua peralatan tersebut, yaitu 12 dan 11,95 cal/cm².

Kategori bahaya 3 dapat diminimalisasi dengan penggunaan PPE yang tepat. Selain itu guna mengurangi resiko bahaya tersebut dapat dilakukan pergantian pengaturan waktu operasi *short time delay trip* pada *circuit breaker* Siemens 3WL tipe ETU25B dari 0,4 detik menjadi 0,1 detik untuk kategori 1 dan 0,2 detik untuk kategori 2 pada Grup 6 dan MCC 8 dan 0,1 detik atau 0,2 detik untuk menurunkan kategori bahaya Panel Sentral menjadi kategori bahaya 1. Perhitungan penurunan resiko bahaya ini ditunjukkan pada Lampiran 3.

Kategori bahaya 1 merupakan kategori bahaya tingkat tinggi yang dapat menyebabkan luka bakar yang stadium dua sehingga dapat menyebabkan luka bakar pada lapisan kulit pertama dan kedua, yaitu epidermis dan dermis. Efek dari luka bakar tersebut adalah kulit melepuh, membengkak, dan mengakibatkan adanya infeksi pada kulit.

Kategori bahaya 1 terjadi pada Penerangan dan Jiang Xi yang memiliki rating arus nominal sebesar 1250 A dan 3200 A yang menggunakan *circuit breaker* Merlin Gerin Air *Circuit Breaker* tipe NW12H1 dan NW32H1 Micrologic 2.0. *Circuit breaker* jenis ini hanya menyediakan operasi *long time delay trip* dan *short time delay*. Pada *circuit breaker* Penerangan, pengaturan arus hubung singkat dengan waktu tunda adalah $I_{sd} = 1,5 \times I_r$, I_r adalah arus beban lebih yang dapat dilewatkan *circuit breaker* tanpa adanya operasi pemutusan gangguan. Dengan pengaturan I_{sd} tersebut maka pada kurva didapatkan waktu pemutusan gangguan sebesar 0,08 detik. Begitu pula dengan Jiang Xi yang memiliki karakteristik waktu – arus yang sama dengan Penerangan. Dengan pengaturan $I_{sd} = 2 \times I_r$, maka didapatkan waktu pemutusan gangguan sebesar 0,07 detik. Sehingga dari kedua waktu pemutusan gangguan tersebut, energi insiden yang terjadi adalah 2,45 dan 2,1 cal/cm² yang merupakan kategori bahaya 1.

Yosh 1 dan Yosh 2 adalah peralatan yang menggunakan *circuit breaker* jenis General Electric Air *Circuit Breaker* tipe MS31F25 yang memiliki rating arus nominal 2000 dan 2500 A. Dengan arus gangguan I_a sebesar 26,76 dan 26,57 kA, maka berdasarkan kurva karakteristik waktu – arus didapatkan waktu pemutusan gangguan sebesar 0,06 detik pada daerah *instantaneous trip*. Sehingga dari waktu pemutusan gangguan tersebut, energi insiden yang terjadi adalah 1,81 dan 1,8 cal/cm² yang merupakan kategori bahaya 1.

Kategori bahaya 0 merupakan kategori bahaya yang terjadi di hampir seluruh peralatan selain peralatan – peralatan yang disebutkan sebelumnya. Pada kategori ini, seorang pekerja dapat mengalami luka bakar stadium dua apabila tidak menggunakan PPE yang ditentukan. Energi insiden yang terjadi kurang dari 1,2 cal/cm² karena waktu pemutusan gangguan yang sangat singkat yaitu pada daerah *instantaneous trip* yang berkisar dari 0,015 – 0,05 detik. Hampir seluruh peralatan yang memiliki kategori bahaya 0 memiliki rating arus nominal di bawah 1300 A dan menggunakan *circuit breaker* jenis Siemens Air *Circuit Breaker* tipe ETU25B.

4.3.2 Energi Insiden Daerah Proteksi Dua

Perhitungan energi insiden pada daerah proteksi dua atau Panel Sentral dilakukan dengan menggunakan metode yang sama yang ditunjukkan pada Lampiran 2 dan hasilnya ditabelkan untuk mempermudah proses perhitungan selanjutnya. Kategori bahaya ditentukan melalui standard yang diberikan oleh NFPA 70E. Hasil perhitungan energi insiden dan penentuan kategori bahaya ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Energi Insiden dan Kategori Bahaya Daerah Proteksi Dua

No.	Peralatan	E_n (J/cm ²)	E_{ins}		Kategori Bahaya
			(J/cm ²)	(cal/cm ²)	
1.	Penerangan	9,89	5,94	1,43	1
2.	Limbah + <i>Base In</i> + Tetes	9,89	7,27	1,75	1
3.	Timbangan + Gil Contoh	9,89	7,42	1,78	1
4.	Besali	9,89	7,42	1,78	1
5.	Pendingin Turbin	9,89	7,27	1,75	1
6.	Yosh 1	9,84	10,35	2,48	1
7.	Yosh 2	9,49	19,94	4,79	2
8.	Jiang Xi	9,89	11,13	2,67	1
9.	WTP	9,89	7,27	1,75	1
10.	MCC 6A	9,89	7,27	1,75	1
11.	Reclamer	9,89	7,27	1,74	1
12.	ESP	9,84	7,24	1,75	1
13.	MCC 4	9,89	7,27	1,75	1
14.	MCC 5	9,89	7,27	1,75	1
15.	Crane	9,89	7,27	1,75	1
16.	DB 13	9,89	7,27	1,75	1
17.	Cultrox + CVP	9,89	7,27	1,75	1
18.	Vacuum Robusi	9,89	7,27	1,75	1
19.	Grup 6	9,89	35,63	8,55	3
20.	RVF	9,89	7,27	1,75	1
21.	Single Tray Baru	9,89	7,27	1,75	1
22.	Grup 4	9,89	7,27	1,75	1
23.	Grup 5	9,89	7,27	1,75	1
24.	MCC 8	9,84	35,47	8,51	1
25.	DB 11	9,89	7,27	1,75	1
26.	Single Tray	9,89	7,27	1,75	1
27.	Injeksi Baru	9,97	7,34	1,76	1
28.	Broad Bent I (BBI)	9,97	7,34	1,76	1
29.	Grup 2	9,89	7,27	1,75	1
30.	Grup 3	9,89	7,27	1,75	1
31.	DB 12 (BBII + WSIV)	9,89	7,27	1,75	1
32.	Grup 1 (Conti 1,2,3)	9,97	7,34	1,76	1
33.	Grup X (BBIII Disconti 6)	9,97	7,34	1,76	1
34.	Grup IX (Conti 12,13,14)	9,97	7,34	1,76	1

Berdasarkan Tabel 4.10 kategori bahaya yang terdapat pada daerah proteksi dua yaitu kategori 3 pada Grup 6 dan MCC 8 di Stasiun Tengah, kategori 2 pada Yosh 2 di Stasiun Ketel, dan kategori 1 pada peralatan lainnya. Peralatan selain Grup 6 dan MCC 8

mengalami peningkatan kategori bahaya karena waktu pemutusan *circuit breaker* semakin lama akibat dari penjumlahan waktu pemutusan dari CB peralatan dan Panel Sentral.

Berdasarkan kategori bahaya tertinggi pada daerah proteksi dua, maka Panel Sentral memiliki resiko bahaya 3 dengan energi insiden normal (E_n) sebesar $9,89 \text{ J/cm}^2$ dan energi insiden (E_{ins}) sebesar $8,55 \text{ cal/cm}^2$.

4.3.3 Energi Insiden Daerah Proteksi Tiga

Perhitungan energi insiden pada daerah proteksi tiga atau PLN Trafo 1 dan 2 dilakukan dengan menggunakan metode yang sama yang ditunjukkan pada Lampiran 2 dan hasilnya ditabelkan untuk mempermudah proses perhitungan selanjutnya. Kategori bahaya ditentukan melalui standard yang diberikan oleh NFPA 70E. Hasil perhitungan energi insiden dan penentuan kategori bahaya ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Energi Insiden dan Kategori Bahaya Daerah Proteksi Tiga

No.	Peralatan	E_n (J/cm^2)	E_{ins}		Kategori Bahaya
			(J/cm^2)	(cal/cm^2)	
1.	Penerangan	10,06	6,04	1,45	1
2.	Limbah + Base In + Tetes	10,06	11,17	2,68	1
3.	Timbangan + Gil Contoh	10,06	11,33	2,72	1
4.	Besali	10,06	11,33	2,72	1
5.	Pendingin Turbin	10,06	11,17	2,68	1
6.	Yosh 1	10,06	14,35	3,44	1
7.	Yosh 2	10,06	24,92	5,98	2
8.	Jiang Xi	10,06	15,10	3,62	1
9.	WTP	10,06	11,17	2,68	1
10.	MCC 6A	10,06	11,17	2,68	1
11.	Reclaimer	10,06	11,17	2,68	1
12.	ESP	10,06	11,17	2,68	1
13.	MCC 4	10,06	11,17	2,68	1
14.	MCC 5	10,06	11,17	2,68	1
15.	Crane	10,06	11,17	2,68	1
16.	DB 13	10,06	11,17	2,68	1
17.	Cultrox + CVP	10,06	11,17	2,68	1
18.	Vacuum Robusi	10,06	11,17	2,68	1
19.	Grup 6	10,06	40,02	9,60	3
20.	RVF	10,06	11,17	2,68	1
21.	Single Tray Baru	10,06	11,17	2,68	1
22.	Grup 4	10,06	11,17	2,68	1
23.	Grup 5	10,06	11,17	2,68	1

Lanjutan Tabel 4.10

24.	MCC 8	10,06	40,02	2,68	3
25.	DB 11	10,06	11,17	2,68	1
26.	Single Tray	10,06	11,17	2,68	1
27.	Injeksi Baru	10,06	11,17	2,68	1
28.	Broad Bent I (BBI)	10,06	11,17	2,68	1
29.	Grup 2	10,06	11,17	2,68	1
30.	Grup 3	10,06	11,17	2,68	1
31.	DB 12 (BBII + WSIV)	10,06	11,17	2,68	1
32.	Grup 1 (Conti 1,2,3)	10,06	11,17	2,68	1
33.	Grup X (BBIII Disconti 6)	10,06	11,17	2,68	1
34.	Grup IX (Conti 12,13,14)	10,06	11,17	2,68	1

Berdasarkan Tabel 4.10 kategori bahaya yang terdapat pada daerah proteksi dua yaitu kategori 3 pada Grup 6 dan MCC 8 di Stasiun Tengah, kategori 2 pada Yosh 2 di Stasiun Ketel, dan kategori 1 pada peralatan lainnya. Peralatan selain Grup 6 dan MCC 8 mengalami peningkatan kategori bahaya karena waktu pemutusan *circuit breaker* semakin lama akibat dari penjumlahan waktu pemutusan dari CB peralatan, Panel Sentral, dan PLN Trafo 1 dan 2.

Berdasarkan kategori bahaya tertinggi pada daerah proteksi dua, maka *low switchgear* PLN Trafo 1 dan 2 memiliki resiko bahaya 3 dengan energi insiden normal (E_n) sebesar $10,06 \text{ J/cm}^2$ dan energi insiden (E_{ins}) sebesar $9,6 \text{ cal/cm}^2$.

4.4 Perhitungan Jarak Batas Proteksi

Jarak batas proteksi merupakan jarak minimum seorang pekerja pada suatu peralatan yang mengalami fenomena busur listrik. Jarak tersebut merupakan jarak seseorang dapat terpapar energi insiden dari sumber busur listrik. Perhitungan jarak batas proteksi busur listrik dilakukan berdasarkan persamaan 2.25 yang merujuk pada standard IEEE 1584 yaitu:

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

Untuk peralatan dengan konfigurasi tertutup maka dipilih $C_f = 1,5$. Energi insiden normal (E_n) dapat dilihat pada Tabel 4.7. Waktu pemutusan gangguan (t) dan eksponen jarak (x) dapat dilihat pada Tabel 4.1 – 4.6 sesuai dengan peralatan yang dianalisis. E_B adalah energi insiden sebesar 5 Joule/cm^2 yang dapat memberi luka bakar stadium dua pada kulit

seorang pekerja apabila tidak menggunakan PPE. Berikut adalah perhitungan jarak batas proteksi pada peralatan – peralatan di masing – masing stasiun.

4.4.1 Jarak Batas Proteksi Daerah Proteksi Satu

Perhitungan jarak batas proteksi pada daerah proteksi satu dilakukan pada Penerangan terlebih dahulu. Dengan memasukkan parameter C_f , E_n , t , x , dan E_B , maka jarak batas proteksi pada panel Penerangan yaitu:

$$\begin{aligned} D_B &= \left[4,184 (C_f)(E_n) \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[4,184 (1,5)(10,62) \left(\frac{0,08}{0,2} \right) \left(\frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}} \\ &= 1.691,45 \text{ mm} \\ &\cong 1,5 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan pada peralatan – peralatan selanjutnya dan daerah proteksi dua dan tiga digunakan metode yang sama dan ditunjukkan pada Lampiran 2 dan hasilnya ditabelkan pada Tabel 4.11 – Tabel 4.13.

4.5 Penentuan *Personnel Protective Equipment*

Setelah diketahui kategori bahaya busur listrik pada masing – masing peralatan, maka dapat ditentukan *Personnel Protective Equipment* (PPE) atau peralatan pelindung dengan merujuk pada standard NFPA 70E pada Tabel 2.7. Penggunaan PPE yang tepat akan meminimalisasi resiko bahaya yang ditimbulkan busur listrik pada pekerja. PPE pada setiap peralatan di seluruh stasiun pada pabrik gula PT. KEBON AGUNG Kota Malang ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Jarak Batas Proteksi dan PPE Daerah Proteksi Satu

Peralatan	Standard Kategori Bahaya	DB (m)	Personnel Protective Equipment
PLN Trafo 1	3	5,5	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik dan <i>balaclava</i> jika diperlukan. Peralatan Pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
PLN Trafo 2	3	5,5	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik dan <i>balaclava</i> jika diperlukan. Peralatan Pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
Panel Sentral	3	5,4	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik dan <i>balaclava</i> jika diperlukan. Peralatan Pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
Penerangan	1	1,7	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang dan celana panjang atau baju terusan tahan api, pelindung wajah atau tudung wajah busur listrik, jaket tahan api. Peralatan pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
Limbah + Base In + Tetes	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Timbangan + Gil Contoh	0	0,8	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Besali	0	0,8	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.

Lanjutan Tabel 4.11

Pendingin Turbin	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Yosh 1	1	1,5	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang dan celana panjang atau baju terusan tahan api, pelindung wajah atau tudung wajah busur listrik, jaket tahan api. Peralatan pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
Yosh 2	1	1,5	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang dan celana panjang atau baju terusan tahan api, pelindung wajah atau tudung wajah busur listrik, jaket tahan api. Peralatan pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
Jiang Xi	1	1,6	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang dan celana panjang atau baju terusan tahan api, pelindung wajah atau tudung wajah busur listrik, jaket tahan api. Peralatan pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
WTP	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
MCC 6A	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Reclaimer	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
ESP	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
MCC 4	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.

Lanjutan Tabel 4.11

MCC 5	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Crane	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
DB 13	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Cultrox + CVP	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Vacuum Robusi	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Grup 6	3	4,5	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik dan <i>balaclava</i> jika diperlukan. Peralatan Pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
RVF	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Single Tray Baru	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Grup 4	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Grup 5	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.

Lanjutan Tabel 4.11

MCC 8	3	4,5	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik dan <i>balaclava</i> jika diperlukan. Peralatan Pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
DB 11	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Single Tray	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Injeksi Baru	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Broad Bent I (BBI)	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Grup 2	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Grup 3	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
DB 12 (BBII + WSIV)	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Grup 1 (Conti 1,2,3)	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Grup X (BBIII Disconti 6)	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
Grup IX (Conti 12,13,14)	0	0,7	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.

4.6 Label Peringatan

Label peringatan adalah hasil dari analisis data yang telah dilakukan dengan merujuk contoh label peringatan pada gambar 2.12. Ukuran label yaitu 4 x 4 inci (standard NFPA 70E). Label peringatan berisi informasi – informasi sebagai berikut:

- Jarak Batas Proteksi Busur listrik
- Kategori Bahaya
- Energi Insiden
- Arus Gangguan
- Tegangan Sistem
- PPE yang Dibutuhkan
- Identitas Peralatan
- Tanggal Pembuatan

Pada hasil penelitian ini label peringatan untuk kategori 0 dan 1 menggunakan label berwarna oranye dan kategori 3 menggunakan warna merah untuk membedakan peralatan mana yang memiliki kategori bahaya tinggi. Peralatan yang mewakili kategori bahaya tersebut adalah MCC 4, Penerangan, dan Panel Sentral yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 sampai 4.4.

! WARNING

Arc-Flash Hazard
Appropriate PPE Required

Flash Protect on Boundary 0.7m Available Fault Current 27,05kA
Hazard Risk Category 0 System Voltage 380V_{AC}
Incident Energy (cal/cm²) 0.55

REQUIRED PPE


<input type="checkbox"/> Helm Pelindung	<input type="checkbox"/> Kemeja & Celana Katun	<input type="checkbox"/> Kacamata Pelindung	<input type="checkbox"/> Tudung wajah arc flash
<input type="checkbox"/> Balaclava	<input type="checkbox"/> Kemeja lengan panjang tahan api	<input type="checkbox"/> Pelindung wajah	<input type="checkbox"/> Jaket arc flash
<input type="checkbox"/> Penutup Telinga	<input type="checkbox"/> Celana panjang tahan api	<input type="checkbox"/> Sarung Tangan Kulit	<input type="checkbox"/> Jaket tahan api
<input type="checkbox"/> Sepatu Proyek			<input type="checkbox"/> Sarung tangan arc flash

Equipment ID: **MCC 4** Date: **06/03/14**

**PT. KEBON AGUNG
PABRIK GULA KEBON AGUNG
MALANG**

Atika R. H.

Gambar 4.2 Label Peringatan MCC 4 – Kategori Resiko Bahaya 0



WARNING

Arc-Flash Hazard

Appropriate PPE Required

Flash Protect on Boundary <u>1,7m</u>	Available Fault Current <u>27,54kA</u>
Hazard Risk Category <u>1</u>	System Voltage <u>380V_{AC}</u>
Incident Energy (cal/cm ²) <u>2,47</u>	

REQUIRED PPE


<input checked="" type="checkbox"/> Helm Pelindung	<input type="checkbox"/> Kemeja & Celana Katun	<input checked="" type="checkbox"/> Kacamata Pelindung	<input type="checkbox"/> Tudung wajah arc flash
<input type="checkbox"/> Balaclava	<input checked="" type="checkbox"/> Kemeja lengan panjang tahan api	<input checked="" type="checkbox"/> Pelindung wajah	<input type="checkbox"/> Jaket arc flash
<input checked="" type="checkbox"/> Penutup Telinga	<input checked="" type="checkbox"/> Celana panjang tahan api	<input checked="" type="checkbox"/> Sarung Tangan Kulit	<input checked="" type="checkbox"/> Jaket tahan api
<input checked="" type="checkbox"/> Sepatu Proyek		<input type="checkbox"/> Sarung tangan arc flash	

Equipment ID: **PENERANGAN** Date: **06/03/14**

PT. KEBON AGUNG
 PABRIK GULA KEBON AGUNG
 MALANG

Atika R. H.

Gambar 4.3 Label Peringatan Penerangan – Kategori Resiko Bahaya 1



WARNING

Arc-Flash Hazard

Appropriate PPE Required

Flash Protect on Boundary <u>5,4m</u>	Available Fault Current <u>25,61kA</u>
Hazard Risk Category <u>3</u>	System Voltage <u>380V_{AC}</u>
Incident Energy (cal/cm ²) <u>8,55</u>	

REQUIRED PPE

<input checked="" type="checkbox"/> Helm Pelindung	<input checked="" type="checkbox"/> Baju terusan tahan api	<input checked="" type="checkbox"/> Kacamata Pelindung	<input checked="" type="checkbox"/> Tudung wajah arc flash
<input type="checkbox"/> Balaclava	<input checked="" type="checkbox"/> Kemeja lengan panjang tahan api	<input type="checkbox"/> Pelindung wajah	<input checked="" type="checkbox"/> Jaket arc flash
<input checked="" type="checkbox"/> Penutup Telinga	<input checked="" type="checkbox"/> Celana panjang tahan api	<input checked="" type="checkbox"/> Sarung Tangan Kulit	<input checked="" type="checkbox"/> Celana arc flash
<input checked="" type="checkbox"/> Sepatu Proyek		<input checked="" type="checkbox"/> Sarung tangan arc flash	

Equipment ID: **PANEL SENTRAL** Date: **06/03/14**

PT. KEBON AGUNG
 PABRIK GULA KEBON AGUNG
 MALANG

Atika R. H.

Gambar 4.4 Label Peringatan Panel Sentral – Kategori Resiko Bahaya 3

