

Tabel 3.
Data Arus Gangguan dan FCT Hasil Simulasi Busur Api

ID Bus	I _{bf} (kA)	I _a (kA)	FCT (s)
63-MCC-2	23.333	22.322	0.4
63-LBS-1A	11.161	10.812	0.4
00-SG-1	11.859	11.476	0.6
GI KUJANG	11.992	11.603	0.8
Bus Housing	9.664	9.385	0.4
GPA Housing	11.715	11.339	0.6
MCC 3	11.644	11.291	0.4
Bus11	8.744	8.506	0.2
2002-K	9.159	8.903	0.4
Bus GTG	9.181	8.924	0.6
Bus82	8.802	8.562	0.2
Bus NPKG	21.578	12.649	0.36
Bus 1074	19,659	9,156	0,12

Tabel 4.
Data Insiden Energi, Jarak Batas Aman, dan Kategori Level Bahaya Hasil Simulasi Busur Api

ID Bus	Insiden Energi (cal/cm ²)	FPB (m)	Kategori Level
63-MCC-2	13.97	11.394	Level 3
63-LBS-1A	7.25	5.806	Level 2
00-SG-1	11.6	9.411	Level 3
GI KUJANG	15.65	12.804	Level 3
Bus Housing	6.22	4.961	Level 2
GPA Housing	11.45	9.286	Level 3
MCC 3	6.69	5.343	Level 2
Bus11	2.8	2.181	Level 1
2002-K	5.88	4.679	Level 2
Bus GTG	8.84	7.116	Level 3
Bus82	2.82	2.197	Level 1
Bus NPKG	15.41	2.166	Level 3
Bus 1074	2,299	0,948	Level 1

sedikit pula energi insiden yang dilepaskan pada saat terjadinya busur api [2]. Dengan berkurangnya energi insiden yang dilepaskan maka bahaya yang ditimbulkan dari busur api ini juga akan berkurang sehingga dampak yang terjadi pada alat dan pekerja dapat berkurang. Diharapkan dari penerapan metode *Zone Selective Interlocking* ini bahaya busur api pada PT Pupuk Kujang dapat diminimalisir hingga mencapai kategori yang lebih rendah.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Sistem proteksi tenaga listrik sangat diperlukan pada sistem kelistrikan untuk mengurangi dampak dari adanya gangguan. Gangguan sistem tenaga listrik dapat mengganggu keberlangsungan kerja sistem dan bahkan dapat merusak peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik [3]. Gangguan yang sering terjadi pada sistem kelistrikan merupakan gangguan beban lebih (overload) dan gangguan hubung singkat (short circuit).

Gangguan hubung singkat pada bahan isolasi padat dan cair dapat menimbulkan busur api hingga timbul kerusakan tetap yang nantinya akan dianggap sebagai gangguan permanen. Terdapat dua macam arus gangguan hubung singkat yaitu arus gangguan hubung singkat simetris dan tidak simetris. Gangguan hubung singkat tiga fasa dan tiga fasa ke tanah menimbulkan arus gangguan simetris. Sedangkan arus gangguan tidak simetris disebabkan oleh gangguan hubung singkat fasa ke fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah dan fasa ke fasa dan pada waktu bersamaan fasa ketiga dengan tanah. Gangguan ini menyebabkan lonjakan arus yang begitu besar sehingga sangat membahayakan

Tabel 1.
Hasil Perhitungan Busur Api Menggunakan Standard IEEE 1584-2002

ID Bus	Tegangan (kV)	Jarak Kerja (mm)	Gap (mm)	X Factor
63-MCC-2	2.4	914	102	0.973
63-LBS-1A	13.8	914	152.4	0.973
00-SG-1	13.8	914	152.4	0.973
GI KUJANG	13.8	914	152.4	0.973
Bus Housing	13.8	914	152.4	0.973
GPA Housing	13.8	914	152.4	0.973
MCC 3	2.4	914	102	0.973
Bus11	13.8	914	152.4	0.973
2002-K	13.8	914	152.4	0.973
Bus GTG	13.8	914	152.4	0.973

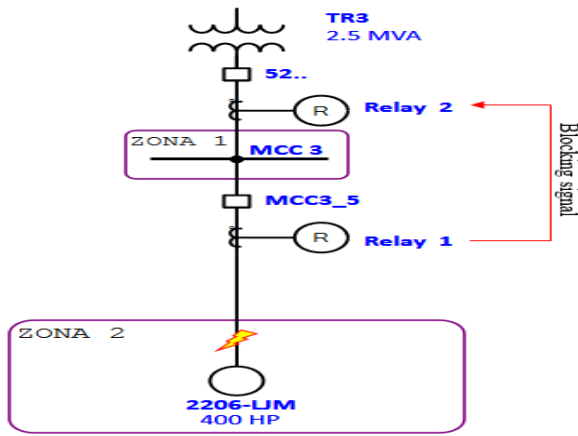
Tabel 2.
Perbandingan Energi Insiden Busur Api Kondisi sebelum ZSI dan Sesudah ZSI

Bus ID	Sebelum penggunaan metode ZSI		Setelah penggunaan metode ZSI	
	FCT (s)	Simulasi Insiden Energi (Cal/cm ²)	FCT (s)	Simulasi Insiden Energi (Cal/cm ²)
63-MCC-2	0,4	13,97	0,2	6,986
63-LBS-1A	0,4	7,25	0,2	3,625
00-SG-1	0,6	11,6	0,2	3,867
GI KUJANG	0,8	15,65	0,2	3,913
Bus Housing	0,4	6,22	0,2	3,111
GPA Housing	0,6	11,45	0,2	3,817
MCC 3	0,4	6,69	0,2	3,344
Bus11	0,2	2,8	0,2	2,8
2002-K	0,4	5,88	0,2	2,938
Bus GTG	0,6	8,84	0,2	2,946
Bus82	0,2	2,82	0,2	2,82
Bus NPKG	0,36	15,41	0,14	5,993
Bus 1074	0,12	2,299	0,12	2,299
MCC 12	0,4	18,404	0,2	9,202
MCC 4	0,4	5,308	0,2	2,654
00-MCC-2	0,36	13,106	0,16	5,825
TIE BREAK	0,4	14,342	0,2	7,171
633-MCC-3C				

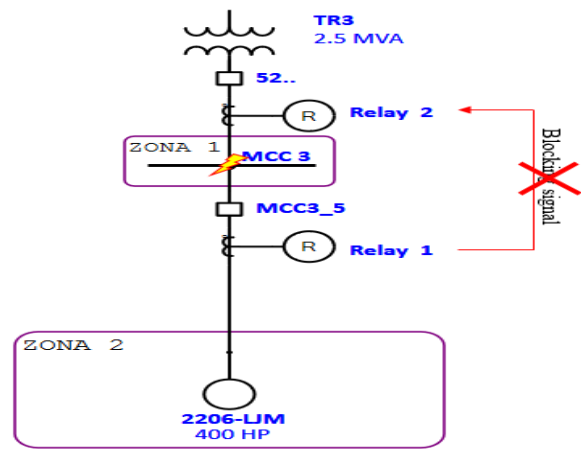
peralatan [3]. Sedangkan gangguan beban lebih disebabkan oleh adanya aliran arus yang besarnya melebihi arus nominal yang diperbolehkan atau saat konsumsi energi listrik melebihi energi listrik yang dihasilkan pada pembangkit. Arus lebih ini dapat menyebabkan kerusakan pada isolasi karena adanya panas yang berlebihan [3].

B. Rele Arus Lebih

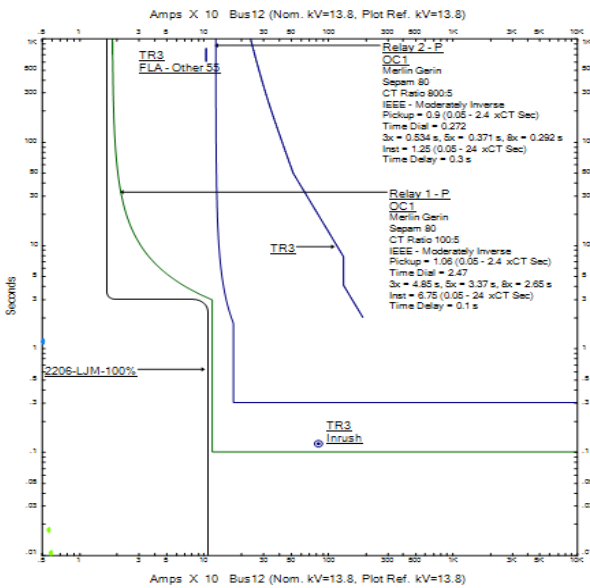
Rele arus lebih atau overcurrent relay berfungsi sebagai pengaman gangguan beban lebih atau overload dan juga gangguan hubung singkat atau short circuit [4]. Rele ini bekerja dengan cara mendeteksi adanya arus lebih yang mengalir pada sistem yang selanjutnya akan dianggap sebagai gangguan, setelahnya rele akan mengirimkan sinyal kepada circuit breaker untuk melakukan trip agar area normal dan area yang terkena gangguan dapat dipisahkan [1]. Berdasarkan karakteristik operasinya, rele arus lebih dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu rele arus lebih waktu tertentu (*definite time relay*) yang bekerja berdasarkan *time delay* yang telah ditentukan sebelumnya, lalu selanjutnya rele arus lebih waktu seketika, rele ini jarang berdiri sendiri, umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih lainnya, rele ini bekerja dalam waktu 10ms saat arus lebih yang mengalir melebihi batas yang telah ditetapkan. Dan yang terakhir rele arus lebih waktu inverse yang waktu kerjanya berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan, sehingga semakin besar arus gangguannya maka akan semakin cepat waktu



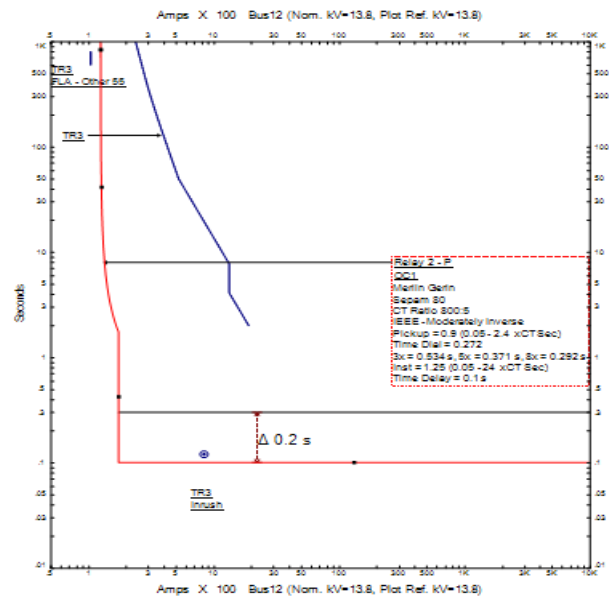
Gambar 4. Simulasi ZSI Gangguan pada sisi beban motor 2206-LJM.



Gambar 2. Simulasi ZSI Gangguan pada sisi bus MCC 3.



Gambar 5. TCC pada saat diberi gangguan pada sisi beban motor 2206-LJM.



Gambar 3. TCC pada saat diberi gangguan pada sisi beban motor 2206-LJM.

operasi dari rele tersebut.

C. Busur Api (Arc Flash)

Arc Flash atau busur api merupakan peristiwa pelepasan energi yang terjadi selama gangguan energi listrik yang diakibatkan oleh adanya *bolted fault* ataupun *arcing fault* [4]. *Arcing fault* merupakan sebutan bagi aliran arus yang mengalir pada saluran yang tidak dimaksudkan untuk dialiri arus [3]. Loncatan arus listrik yang dimaksud pada arcing fault ini dapat mengalir melalui udara antara konduktor dengan konduktor ataupun konduktor dengan tanah [5]. Sedangkan *bolted fault* menggunakan perantara konduktor sebagai arus gangguannya. Adapun beberapa akibat dari terjadinya busur api atau *arc flash* ini seperti cahaya yang menyilaukan, suara yang memekakan telinga, panas menyengat, bahan kimia beracun, hingga ledakan besar. Kategori bahaya busur api dapat ditentukan berdasarkan besarnya nilai insiden energi yang timbul pada saat terjadinya busur api.

Energi Insiden merupakan jumlah energi di permukaan yang dihasilkan selama peristiwa busur listrik pada jarak tertentu dari sumber. Untuk menghitung besarnya insiden energi dengan tegangan kurang dari 15kV persamaan yang digunakan adalah [6].

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (1)$$

Sedangkan untuk tegangan lebih dari 15kV, besarnya insiden energi dapat dicari dengan persamaan metode Lee sebagai berikut:

$$E = 2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^x}\right) \quad (2)$$

Dengan keterangan untuk persamaan (1) dan (2) adalah sebagai berikut:

- E = Energi insiden (J/cm²)
- C_f = Faktor pengali
- E_n = Energi insiden yang dinormalisasi (10^{K1+K2+1.081(Ia)+0.0011G}), dimana
 - K1 = -0.792 untuk konfigurasi terbuka (no enclosure) dan -0.555 untuk konfigurasi box (enclosed equipment)
 - K2 = 0 untuk sistem *ungrounded* ataupun *high-resistance-grounded* dan -0.113 untuk sistem *grounded*
- I_a = arus *arcing fault* (kA)
- G = gap antara busbar dan konduktor (mm)
- t = Lama waktu terjadinya busur api / Fault Clearing Time (detik)
- D = Jarak antara titik busur api dengan pekerja (mm)
- x = Faktor eksponen jarak antar konduktor
- I_{bf} = Arus *bolted fault* (kA)
- V = Level tegangan bus (kV)

D. Jarak Batas Aman Busur Api

Arc flash boundary atau jarak batas aman busur api merupakan sebuah pendekatan mengenai batas dimana seseorang dapat menerima luka bakar tingkat dua saat busur api terjadi. Terdapat 4 kategori batasan jarak aman sesuai dengan nilai insiden energi busur api yang terjadi [1].

1) Flash Protection Boundary

Pada batasan ini, seorang pekerja dapat menerima luka bakar tingkat dua jika tidak menggunakan alat perlindungan diri pada saat busur api dengan titik insiden energi sebesar $1.2 \text{ cal/cm}^2 / 5 \text{ J/cm}^2$

2) Limited Approach Boundary

Batas pendekatan terhadap jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dimana pada bagian tersebut terdapat bahaya sengatan listrik.

3) Restricted Approach Boundary

Batas pendekatan terhadap jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dengan bahaya sengatan dengan resiko lebih besar karena busur api dikombinasikan dengan gerakan yang tidak disengaja.

4) Prohibited Approach Boundary

Batas pendekatan terhadap jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dimana pada jarak tersebut pekerja dianggap melakukan kontak langsung dengan konduktor listrik.

Untuk tegangan kurang dari 15kV, jarak batas aman busur api dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [3].

$$D_B = \sqrt[3]{4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)} \quad (3)$$

Sedangkan untuk tegangan lebih dari 15kV, jarak batas aman busur api dapat dicari dengan persamaan metode Lee sebagai berikut;

$$D_B = \sqrt{2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)} \quad (4)$$

Dengan keterangan untuk persamaan (3) dan (4) adalah sebagai berikut:

- D_B = Jarak aman antara pekerja dengan titik arc (mm)
- C_f = Faktor pengali, bernilai 1 untuk tegangan diatas 1 kV dan bernilai 1,5 untuk tegangan dibawah 1 kV
- E_n = Energi insiden yang dinormalisasi
- E_B = Energi Insiden (J/cm^2) pada jarak batas busur api, memiliki nilai sebesar 5 J/cm^2
- t = Lama waktu terjadinya busur api (detik)
- x = Faktor eksponen jarak antar konduktor
- I_{bf} = Arus bolted fault (kA)
- V = Level tegangan bus (kV)

E. Metode Zone Selective Interlocking

Metode zone selective interlocking ini merupakan salah satu metode yang cukup efektif untuk mengurangi insiden energi busur api dikarenakan harganya yang relatif murah jika dibandingkan dengan harga rele bus differensial, selain itu metode ini juga tidak memerlukan ruang yang lebih besar pada switchgear [5]. Metode ZSI ini juga tidak memerlukan perubahan apapun pada operasi dari switchgearnya, sedangkan untuk instalasinya ZSI hanya membutuhkan kabel, tenaga kerja, serta trip unit yang sudah memiliki fitur

ZSI [7].

Fitur ZSI ini memungkinkan trip unit atau rele pelindung untuk melakukan komunikasi antar zona sehingga antar trip unit satu dan trip unit lainnya dapat mengirimkan dan menerima sinyal yang digunakan untuk menentukan area kerja CB untuk trip sehingga respon rele terhadap gangguan akan lebih cepat dan efektif [5]. Tanpa koneksi ZSI, sistem akan membuat CB terdekat dari lokasi gangguan melakukan trip untuk membersihkan gangguan sesuai waktu yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan menggunakan koneksi ZSI, maka saat terjadi gangguan CB terdekat akan melakukan trip tanpa time delay dan menghiraukan waktu yang telah disetting sebelumnya. Hal ini yang dapat mengurangi besarnya nilai insiden energi busur api dikarenakan semakin cepat gangguan dihilangkan maka akan semakin kecil pula nilai insiden energinya [2]. Cara kerja dari ZSI akan dijelaskan melalui Gambar 1.

Diasumsikan bahwa terjadi gangguan pada lokasi Fault 3, maka Breaker 3 akan trip tanpa time delay sekaligus mengirimkan sinyal kepada Breaker 2 untuk trip sesuai time delay dan juga sebagai back up dari Breaker 3. Timing dari ZSI adalah sebesar 0.01 detik sehingga sebelum breaker trip tanpa time delay, sinyal blocking akan dikirimkan terlebih dahulu kepada breaker yang bertugas sebagai back up [5]. Begitu juga saat terjadi trip pada lokasi Fault 2, Breaker 2 akan bertugas untuk mengamankan gangguan secara langsung serta mengirimkan sinyal kepada Breaker 1 yang bertugas menjadi back up dari Breaker 2 tersebut.

Sedangkan saat terjadi gangguan pada lokasi Fault 1, Breaker 1 tidak akan menerima blocking sinyal dari breaker manapun sehingga Breaker 1 akan melakukan trip secara langsung tanpa time delay. Breaker satu dengan breaker lainnya dapat mengirimkan dan menerima sinyal melalui kabel yang telah dihubungkan satu sama lain. Dengan menggunakan prinsip tersebut maka gangguan yang terjadi dapat diamankan dengan lebih cepat sehingga besar insiden energi yang timbul akan menjadi lebih kecil (Gambar 1).

III. SISTEM KELISTRIKAN PADA PT. PUPUK KUJANG

PT Pupuk Kujang memiliki 2 buah pabrik yaitu pabrik K-1A dan pabrik K-1B yang terletak di Cikampek, Jawa Barat sebagai penghasil pupuk. PT. Pupuk Kujang memiliki empat generator yang berfungsi sebagai sumber utama tempat terbangkitnya listrik. Terdapat 2 buah Generator Turbine Gas dengan kapasitas masing-masing sebesar 18,35 MW dan juga 11,884 MW dan juga 2 Steam Generator dengan kapasitas 0,75 MW. Namun saat ini pabrik PT Pupuk Kujang hanya mendapatkan supply dari 1 generator saja yaitu generator 2006-J (GTG HITACHI) dan utility dari PLN sedangkan generator yang lain pada posisi out of service. Sistem kelistrikan dari PT Pupuk Kujang berupa single line diagram yang dapat dilihat pada Gambar 2.

IV. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi

Simulasi busur api ini dilakukan dengan tujuan mengetahui besar energi insiden busur api, jarak batas aman bagi para pekerja atau Flash Protection Boundary (FPB) dan juga untuk

mengetahui kategori bahaya busur api pada bus yang termasuk kedalam tipikal yang telah dipilih pada PT Pupuk Kujang. Pada hasil simulasi busur api ini akan didapatkan data berupa nilai arus bolted fault (I_{bf}), arus arcing (I_a), Fault Clearing Time (FCT) yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Didapatkan pula hasil energi insiden busur api (E), jarak batas aman atau *Flash Protection Boundary* (FPB), dan juga kategori level bahaya busur api pada setiap busnya yang dapat dilihat pada Tabel 2.

B. Hasil Perhitungan Busur Api

Berdasarkan pada Tabel 1 dan Tabel 2, kita masih memerlukan beberapa parameter untuk melakukan perhitungan busur api dengan standar IEEE 1584-2002. Parameter tersebut diantaranya adalah Tegangan (kV), *Working Distance* atau jarak kerja (mm), Gap (mm), dan juga X factor yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Salah satu contoh rincian perhitungan busur api pada bus 63-MCC-2 dengan standard IEEE-1584-2002 sebagai berikut:

Perhitungan arus arcing (I_a):

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

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg(23,333)$$

$$I_a = 22,322 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

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

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(22,322)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \log(22,322)+0,0011 \times 102}$$

$$E_n = 10,356 \frac{J}{cm^2}$$

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

$$E = 4,184 \times 1 \times 10,356 \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 58,46 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 58,46/4,184$$

$$E = 13,97 \text{ Cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas aman (D):

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

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 10,356 \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5,02}\right)}$$

$$D_B = 11,394 \text{ m}$$

C. Simulasi Pengurangan Energi Insiden Busur Api Menggunakan Metode Zone Selective Interlocking

Pada bagian ini dijelaskan mengenai penggunaan metode *zone selective interlocking* pada tipikal 1 dengan level tegangan 2,4 kV yang membahas mengenai peralatan pengaman utama motor 2206-LJM dan pengaman utama bus MCC 3. Pengaplikasian metode ZSI ini bertujuan untuk mengetahui besar pengurangan insiden energi busur api pada tipikal tersebut. Pada pengaplikasian metode ZSI ini akan dilakukan simulasi gangguan pada sisi beban motor 2206-LJM dan juga pada sisi bus MCC 3. Berikut merupakan rincian dari cara kerja metode ZSI pada tipikal 1

1) Diberikan Gangguan pada Sisi Beban Motor 2206-LJM

Pada kondisi ini gangguan diberikan pada sisi motor yang dapat dilihat pada Gambar 3. Pada kondisi ini gangguan terjadi pada zona 2 yaitu pada sisi beban motor 2206-LJM. Pengaman yang merasakan adanya gangguan ialah pengaman yang bertugas mengamankan gangguan pada zona 2 yaitu dan juga zona 1 yaitu Relay 1 dan Relay 2. Saat Relay 1 yang merupakan pengaman utama pada zona 2 merasakan adanya gangguan, maka Relay 1 tersebut akan mengirimkan sinyal blocking kepada Relay 2 untuk menahan waktu trip ZSI Relay 2 sehingga Relay 2 akan menjadi back up dari Relay 1 dengan time delay yang seharusnya yaitu 0,3 detik. Karena Relay 1 merasakan gangguan dan tidak menerima sinyal blocking maka Relay 1 akan trip dengan waktu ZSI sebesar 0,1 detik. TCC pada ETAP yang menggambarkan waktu trip dari setiap relay yang merasakan gangguan dapat dilihat pada Gambar 4.

Seperti terlihat pada TCC Gambar 4 bahwa Relay 2 tidak mengalami perubahan time delay yaitu tetap sebesar 0,3 detik dikarenakan mendapatkan sinyal blocking dari pengaman dibawahnya yaitu Relay 1.

2) Diberikan Gangguan pada Bus MCC 3

Pada kondisi ini gangguan diberikan pada sisi bus MCC 3 seperti yang terlihat pada Gambar 5. Pada kondisi ini gangguan terjadi pada zona 1 yaitu pada bus MCC 3. Saat terjadi gangguan pada zona 1 maka pengaman yang merasakan adanya gangguan hanyalah Relay 2 saja yang berada diatas bus MCC 3 dan bertugas mengamankan zona 1, sedangkan Relay 1 tidak merasakan adanya gangguan dikarenakan rele tersebut hanya bertugas mengamankan daerah zona 2. Karena Relay 1 tidak merasakan adanya gangguan pada daerah yang dilindunginya, yaitu zona 2, maka rele tersebut tidak akan mengirimkan sinyal blocking kepada Relay 2 sehingga Relay 2 akan trip tanpa delay yaitu sebesar 0,1 detik dikarenakan adanya metode ZSI. TCC pada etap yang menggambarkan kerja dari Relay 2 dapat dilihat pada Gambar 6. Terlihat pada Gambar 6 bahwa terdapat pengurangan time delay sebesar 0,2 detik pada Relay 2, dari yang seharusnya Relay 2 mengamankan gangguan dengan time delay sebesar 0,3 detik namun karena adanya metode ZSI time delay dari Relay 2 menjadi 0,1 detik. Hal tersebut disebabkan karena Relay 2 merasakan adanya gangguan namun tidak menerima sinyal blocking dari pengaman lainnya sehingga rele tersebut akan mengamankan gangguan dengan waktu trip ZSI yaitu sebesar 0,1 detik.

D. Perbandingan Besar Energi Busur Api Sebelum dan Setelah Menggunakan Metode Zone Selective Interlocking

Selanjutnya pada bagian ini akan dibandingkan hasil dari *fault clearing time* (FCT) dan energi insiden busur api dan kategori bahaya busur api dengan kondisi sebelum penggunaan metode ZSI dan juga setelah penggunaan metode ZSI pada semua bus PT Pupuk Kujang dengan tegangan 13,8kV dan juga 2,4kV yang dapat dilihat pada Tabel 4.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari simulasi, perhitungan, dan juga analisis data yang telah dilakukan pada tugas akhir, maka dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu: (1) Dari hasil simulasi menggunakan software ETAP 19.0.1 dapat diketahui bahwa masih terdapat banyak bus yang memiliki nilai energi insiden busur api dengan kategori level 3 walaupun telah dilakukan setting koordinasi pengaman. (2) Setelah penggunaan metode ZSI dapat diketahui bahwa metode ZSI dapat mengurangi besarnya nilai energi insiden busur api tanpa mengorbankan setting koordinasi pengaman yang telah dilakukan. (3) Metode ZSI lebih efisien dalam mengurangi besarnya nilai energi insiden busur api yang terjadi dibandingkan dengan penggunaan rele bus differensial yang membutuhkan CT atau Current Transformer sehingga membutuhkan lebih banyak ruang. (4) Metode ZSI dapat mengurangi besarnya nilai energi insiden busur api yang terjadi pada bus-bus sebagai berikut: Bus 63-MCC-2 sebesar 49,99% dari 13,97 cal/cm² menjadi 6,986 cal/cm², Bus 63-LBS-1A sebesar 50% dari 7,25 cal/cm² menjadi 3,625 cal/cm², Bus 00-SG-1 sebesar 66,66% dari 11,6 cal/cm² menjadi 3,867 cal/cm², Bus GI KUJANG sebesar 74,99% dari 15,65 cal/cm² menjadi 3,913 cal/cm², Bus Housing sebesar 49,98% dari 6,22 cal/cm² menjadi 3,111 cal/cm²,

Bus GPA Housing sebesar 66,66% dari 11,45 cal/cm² menjadi 3,817 cal/cm², Bus MCC 3 sebesar 50,01% dari 6,69 cal/cm² menjadi 3,344 cal/cm², Bus 2002-K sebesar 50,03% dari 5,88 cal/cm² menjadi 2,938 cal/cm², Bus GTG sebesar 66,67% dari 8,84 cal/cm² menjadi 2,946 cal/cm², Bus NPKG sebesar 61,1% dari 15,41 cal/cm² menjadi 5,993 cal/cm², Bus MCC 12 sebesar 50% dari 18,404 cal/cm² menjadi 9,202 cal/cm², Bus MCC 4 sebesar 50% dari 5,308 cal/cm² menjadi 2,654 cal/cm², Bus 00-MCC-2 sebesar 55,55% dari 13,106 cal/cm² menjadi 5,825 cal/cm², Bus TIE BREAK 633-MCC-3C sebesar 50% dari 14,342 cal/cm² menjadi 7,171 cal/cm².

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Simms and G. Johnson, "Protective Relaying Methods for Reducing Arc Flash Energy," in *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2010, pp. 1–15. doi: 10.1109/CPRE.2010.5469495.
- [2] C. G. Walker, "Arc-flash energy reduction techniques: Zone-selective interlocking and energy-reducing maintenance switching," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 2, pp. 814–824, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2244831.
- [3] Z. Pane, "Proteksi Sistem Tenaga: Power System Protection," Departemen Teknik Elektro, Universitas Sumatera Utara, 2014.
- [4] B. W. C. Listyawan, "Studi Koordinasi Proteksi pada Sistem Tegangan Menengah di PT Ajinomoto Mojokerto dengan Mempertimbangkan Busur Api Menggunakan Metode Perhitungan yang Dimodifikasi," Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [5] R. F. Pujiantara, M. Pujiantara, A. Priyadi, and D. A. Asfani, "Protection Coordination Using Zone Selective Interlocking Method and Neural Network in IEEE 9 Bus Plan," in *2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, 2018, pp. 196–201. doi: 10.1109/ICOIACT.2018.8350817.
- [6] J. M. Gers and E. J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*, 2nd ed., vol. 47. United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [7] D. L. Hodgson and D. Shipp, "Arc-flash Incident Energy Reduction Using Zone Selective Interlocking," in *2008 55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, 2008, pp. 1–9. doi: 10.1109/PCICON.2008.4663965.