

# Metode Kurva Batasan Energi Untuk Evaluasi Resiko *Arc-flash* Pada Sistem PLTU

Chandra Wiharya<sup>a\*</sup>, Priya Surya Harijanto<sup>a)</sup>, Farrasdito Aulia Rizky<sup>a)</sup>

(Received 21 November 2023 || Revised 22 Desember 2023 || Accepted 30 Oktober 2024)

**Abstract:** In an effort to determine the Personal Protective Equipment (PPE) required to protect against arc-flash hazards based on IEEE Std. 1584-2002, a simplified analysis technique was used with the energy limit curve method. The problem addressed was the potential inaccuracies in determining the required PPE level and maximum flash-protection distance when the traditional method does not precisely calculate the incident energy level and flash-protection limit. The purpose of this study was to evaluate a method that could be applied to various types of overcurrent protective devices in electrical systems, thus simplifying the arc-flash analysis. The method involved using the energy limit curve, which allows for quicker determination of the necessary PPE by plotting relay/fuse curves into the energy limit curve. This approach was implemented and tested at PLTU Paiton Unit 7 (PT. POMI). Important findings indicated that the energy limit curve method significantly reduced the time required to determine the appropriate PPE category compared to the IEEE 1584-2002 standard. The results showed that the process of determining the PPE category was more efficient, with fewer data requirements and shorter calculation times. The implications of this research suggest that the energy limit curve method can simplify arc-flash calculations for large industries with numerous buses, enhancing the overall safety protocols by providing a faster and potentially more accurate means of assessing arc-flash hazards and PPE requirements.

**Keywords:** arc-flash, energy limit curve, personal protective equipment (PPE).

## 1. Pendahuluan

Penelitian ini penting karena karakterisasi potensi bahaya arc-flash dalam sistem tenaga listrik telah meningkatkan pemahaman akan ancaman yang dihadapi oleh individu yang bekerja di sekitar perangkat yang terpapar. Bahaya arc-flash dapat menyebabkan cedera serius dan kerusakan peralatan, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam upaya mitigasi. Mengidentifikasi dan mengukur risiko arc-flash dengan tepat adalah langkah awal yang krusial dalam menentukan langkah-langkah perlindungan yang sesuai [1], [2]. Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) atau *Personal Protective Equipment* (PPE) yang tepat berdasarkan analisis yang akurat dapat mengurangi risiko cedera pekerja secara signifikan. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada penyederhanaan dan peningkatan akurasi metode analisis bahaya arc-flash.

Masalah utama yang dihadapi dalam analisis bahaya arc-flash adalah kompleksitas perhitungan yang menggunakan metode standar IEEE 1584-2002. Metode ini memerlukan data yang sangat rinci dan waktu yang lama untuk menentukan tingkat energi insiden dan kategori PPE yang sesuai. Kesalahan dalam perhitungan dapat menyebabkan penentuan PPE yang tidak tepat, meningkatkan risiko cedera bagi pekerja. Selain itu, banyaknya bus dan perangkat proteksi arus lebih atau *Over Current Protective Device* (OCPD) dalam industri besar memperumit proses analisis [3], [4]. Maka dari itu, diperlukan metode alternatif yang lebih efisien namun tetap akurat.

Beberapa penelitian telah mencoba menyederhanakan analisis bahaya arc-flash berdasarkan IEEE 1584-2002 ini. Misalkan Situngkir et al. meneliti bahaya arc flash pada sistem kelistrikan tegangan 6,3 kV di PT. Semen Padang, Sumatera Barat, menggunakan metode perhitungan modifikasi, dengan hasil nilai insiden energi arc flash lebih rendah dibandingkan dengan standar IEEE 1584-2002 [1]. Taufiqi et al. melakukan perhitungan untuk mengurangi nilai energi arc flash di PT. Asahimas Flat Glass Tbk. Sidoarjo melalui metode *resetting* koordinasi proteksi. Hasilnya menunjukkan penurunan signifikan dalam nilai insiden energi dari 31.576 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 10.764 cal/cm<sup>2</sup>, 30.387 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 16.8 cal/cm<sup>2</sup>, dan 30.513 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 15.94 cal/cm<sup>2</sup> [2].

Kusalya et al. menganalisis busur api di PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim menggunakan metode kurva batasan energi. Hasilnya adalah metode menyederhanakan dan mempercepat penentuan kategori PPE dibandingkan metode IEEE 1584-2002, meskipun terdapat perbedaan jarak batas aman karena metode ini tidak memperhitungkan nilai insiden energi dan *fault clearing time* [3]. Sugiharto dan Abduh mengukur energi arc flash dan mengklasifikasi kategori Personal Protective Equipment (PPE) di PT Holcim Indonesia Tbk. Bogor, Jawa Barat, menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan NFPA 70E-2009. Hasil penelitian menunjukkan nilai insiden energi di area Finish Mill 5 bervariasi, dengan BUS MD-1 sebesar 16,92 kal/cm<sup>2</sup>, BUS RM-1 sebesar 1,39 kal/cm<sup>2</sup>, BUS FN-2 sebesar 1,35 kal/cm<sup>2</sup>, BUS TR-71 sebesar 2,17 kal/cm<sup>2</sup>, BUS TR-72 sebesar 1,41 kal/cm<sup>2</sup>, dan BUS TR-73 sebesar 1,34 kal/cm<sup>2</sup> [4]. Firdaus et al. menentukan PPE dari bahaya busur api di Bandara Internasional Juanda menggunakan metode kurva batasan energi dan standar IEEE 1584-2002. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode kurva batasan energi menyederhanakan dan mempercepat proses penentuan kategori PPE dibandingkan dengan standar IEEE 1584-2002 [5]. Maulana et al. menganalisis pengaruh Setting OCR terhadap arc flash pada tegangan 20 kV di Panel AK19 Substation Diesel PT Krakatau Daya Listrik menggunakan standar IEEE 1584-2002 dan Metode Ralph Lee yang disimulasikan dengan software ETAP Power Station. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Fault Clearing Time* (FCT) mempengaruhi besar insiden energi arc flash, dengan insiden energi sebesar 58,35 Cal/cm<sup>2</sup> untuk FCT 0,3 s dan 5,8 Cal/cm<sup>2</sup> untuk FCT 0,03 s, menunjukkan bahwa semakin cepat FCT, semakin kecil energi arc flash dan kategori PPE yang diperlukan [6]. Penelitian ini mengusulkan metode kurva batasan energi untuk menyederhanakan analisis bahaya arc-flash di PLTU Paiton Unit 7. Metode ini mempermudah penentuan kategori APD dengan memplot kurva relay atau fuse ke dalam kurva batasan energi, mengurangi data dan waktu analisis tanpa mengurangi akurasi. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi efektivitas metode tersebut dalam meningkatkan keselamatan kerja di industri listrik

\* Korespondensi: chandra.wiharya@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jl. Sukarno Hatta no.9 Kota Malang, Jawa Timur Indonesia

**2. Metode**

**2.1 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bahaya arc-flash di PLTU Paiton Unit 7 dengan metode kurva batasan energi, menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1 untuk simulasi dan validasi lapangan. Pengumpulan data awal mencakup arus hubung singkat, karakteristik relay proteksi, dan konfigurasi bus. Setelah simulasi dan analisis menggunakan ETAP, hasilnya divalidasi dengan pengujian menggunakan osiloskop digital. Penentuan kategori PPE dilakukan dengan membandingkan metode kurva batasan energi dan metode IEEE 1584-2002. Evaluasi efisiensi dan akurasi dilakukan melalui uji-t statistik, dan rekomendasi diberikan untuk implementasi metode ini dalam meningkatkan keselamatan kerja.

**2.2 Arc-flash**

Menurut *National Fire Protection Association (NFPA) 70E 2004*, [8] Arc-flash adalah pelepasan energi listrik berbahaya akibat arcing fault, disebabkan oleh kegagalan mekanik, isolasi, debu, korosi, atau kesalahan manusia. Dampaknya termasuk suhu ekstrem, ledakan, dan gas beracun [9]. Mengurangi energi arc-flash dan menentukan PPE sesuai standar NFPA 70E penting untuk melindungi pekerja [10].

**2.3 Perhitungan Energi Arc-flash Menggunakan Standart IEEE 1584-2002**

Pada metode ini, hal pertama yang harus diperhitungkan adalah mencari nilai dari arus *arcing fault*. Persamaan untuk menghitung dari arus *arcing fault* sendiri tergantung dari besarnya level tegangan bus.

Untuk level tegangan kurang dari 1kV, persamaan arus *arcing fault* adalah:

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

Untuk level tegangan 1kV – 15kV, perhitungan arus *arcing fault* menggunakan persamaan:

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \tag{2-1}$$

Maka nilai  $I_a$  dapat diperoleh:

$$I_a = 10^{\log I_a} \tag{2-2}$$

Dimana :

- Log = log10
- $I_a$  = arus *arcing* (kA)
- K = konstanta untuk konfigurasi terbuka= -0,153 dan konstanta untuk konfigurasi box= -0,097
- $\log I_{bf}$  = *boltd fault current* pada gangguan tiga fasa (symmetrical RMS) (kA)
- V = tegangan sistem (kV)
- G = jarak celah antar konduktor (mm)

Setelah nilai *arcing current* diketahui maka nilai dari *incident energy* normalisasi dapat dihitung. Dalam perhitungan besar energi

yang normal, menggunakan referensi waktu *arcing* dengan durasi 0,2 detik dan jarak dari titik *arcing* ke manusia sebesar 610 mm. Persamaan yang digunakan adalah:

$$\log E_n = K1 + K2 + 1,081 \log I_a + 0,0011 G \tag{2-3}$$

Dimana :

- $E_n$  = *incident energy normalized* (J/cm<sup>2</sup>)
- K1 = -0,792 untuk konfigurasi terbuka (*no enclosure*)  
-0,555 untuk konfigurasi box (*enclosed equipment*)
- K2 = 0 untuk sistem *ungrounded and high-resistance grounded*  
-0,113 untuk sistem *grounded*
- G = jarak/celah antar konduktor (mm)

Untuk mendapatkan nilai G (jarak antar konduktor) dapat mengikuti standar yang sudah ada. Peralatan yang digunakan dalam sistem kelistrikan. Dalam tabel 2.1 [11] dijelaskan untuk jarak celah bus pada beberapa peralatan lain dengan referensi dari IEEE 1584-2002.

TABEL 2.1 TABEL DATA JARAK CELAH BUS (JARAK BUS)

Kelas Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)
6-15 kV <i>Switchgear</i>	153
5 kV <i>Switchgear</i>	102
<i>Low Voltage Switchgear</i>	32
<i>Low Voltage MCC and Panelboards</i>	25
<i>Cable</i>	13
<i>Other</i>	<i>Not required</i>

Setelah itu besar energi  $E_n$  dapat diketahui :

$$E_n = 10 \log E_n \tag{2-4}$$

Nilai dari  $E_n$  dan t akan bergantung pada besarnya arus gangguan pada lokasi yang dipertimbangkan dan karakteristik dari peralatan proteksi arus lebih (OCPD) pada bagian *upstream*. Setelah nilai  $E_n$  didapatkan, untuk menghitung besar insiden energi E digunakan persamaan :

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

Dimana:

- E = *incident energy* (J/cm<sup>2</sup>)
- $C_f$  = faktor pengali 1,0 untuk tegangan diatas 1kV, dan 1,5 untuk tegangan dibawah 1kV
- $E_n$  = *incident energy normalized*
- t = waktu *arcing* (detik)
- D = jarak kerja (mm)
- x = jarak exponent

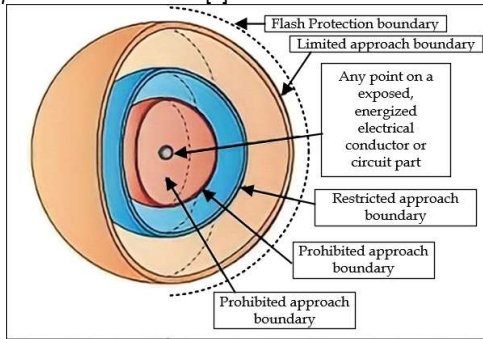
Untuk memenuhi semua parameter-parameter dalam menghitung besarnya insiden energi (E) dapat melihat pada tabel 2.2. Parameter yang dapat dicari dalam tabel ini yaitu jarak celah antar konduktor (G), jarak eksponen (x), dan jarak kerja (D). Adapun nilai dari parameter-parameter yang dimaksud adalah sebagai berikut:

TABEL 2.2 TABEL DATA PARAMETER-PAREMETER

Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)	Jarak eksponen	Jarak kerja (mm)
0,208 – 1	Open air	10-40	2	-
	Switcgear	32	1,473	455
	MCC and panels	25	1,641	455
	Cable	13	2	455
>1 – 5	Open air	102	2	-
	Switcgear	13-102	0,973	610
	Cable	13	2	455
>5 - 15	Open air	13-153	2	-
	Switcgear	153	0.973	910
	Cable	13	2	455

2.4 Flash Protection Boundary

NFPA 70E-2004 mendefinisikan sebuah boundaries berhubungan dengan keselamatan ketika pekerja bekerja pada peralatan yang bertegangan. Hanya orang-orang yang memenuhi syarat yang dapat masuk ke area ini dan mereka diwajibkan memakai personal protection equipment (PPE) yang sesuai dengan protection boundaries [7].



GAMBAR 2.1 BAGIAN-BAGIAN DARI FLASH PROTECTION BOUNDARIES

Bagian-bagian dari flash protection boundaries, sebagai berikut:

- Flash Protection Boundary**  
Batas dimana level insiden energi sama dengan 1,2 cal/cm dengan fault clearing time lebih besar dari 0,1s. Pada batas ini apabila pekerja tidak dilengkapi peralatan pelindung beresiko terkena luka bakar hingga tingkat dua.
- Limited Approach Boundary**  
Batas pendekatan jarak dari bagian konduktor aktif dimana terdapatsebuah bahaya sengatan listrik.
- Restricted Approach Boundary**  
Batas perlindungan yang bisa dijangkau oleh seorang pekerja yangsudah mempunyai keahlian dalam bidang terkait. Ketikamenjangkau wilayah tersebut dibutuhkan shock protection teknis dan peralatan yang memadai.
- Prohibited Approach Boundary**  
Batas pendekatan jarak dari konduktor aktif dimana pekerjadianggap seperti melakukan kontak langsung dengan konduktor aktif.

Perhitungan level insiden energi (EWD) untuk sistem tegangan antara1-15kV pada jarak kerja (DWD) adalah :

$$EWD = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^{x WD}}\right) \tag{2-6}$$

Sedangkan perhitungan level insiden energi (EB) pada jarak aman perlindungan (DB) adalah.

$$EB = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^{x B}}\right) \tag{2-7}$$

Jika persamaan (2.6) diatas dibagi dengan persamaan (2.7) maka :

$$\frac{E_B}{E_{WD}} = \left(\frac{D_B}{D_{WD}}\right)^{-x} \tag{2-8}$$

Sehingga untuk mencari jarak aman tiap kategori PPE :

$$DB = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} \tag{2-9}$$

Sedangkan untuk sistem lebih dari 15 kV sebagai berikut :

$$DB = \frac{D_{WD}}{2 \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} \tag{2-10}$$

Dimana :

- DB = Jarak dalam milimeter dari Arc-flash Boundary.
- C<sub>f</sub> = Faktor perhitungan berdasarkan pada tegangan sistem (1,5 untuk tegangan dibawah 1kV dan 1,0 untuk 1-15kV)
- E<sub>n</sub> = Insiden energi saat keadaan normal ( J/cm<sup>2</sup> )
- EB = Energi insiden dalam Joule per cm<sup>2</sup> (J/cm<sup>2</sup>) pada AFB. Biasanya 5 J/cm<sup>2</sup>, yang sama dengan 1,2 cal/cm<sup>2</sup>.
- 4,184 = Konversi dari cal/cm<sup>2</sup> ke J/cm<sup>2</sup>
- t = Lamanya gangguan arcing (detik)
- X = Eksponen jarak
- 610 = Jarak normalisasi 24 inci yang dikonversi ke milimeter
- 0,2 = Waktu lengkung 0,2 detik yang dinormalisasi.

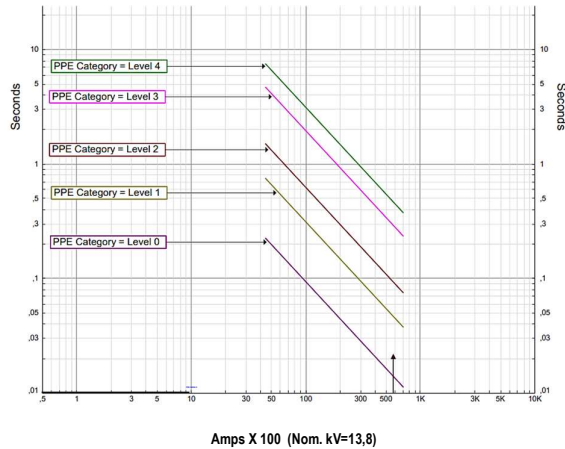
2.5 Metode Perhitungan Arc-flash dengan Kurva Batas Energi

2.4.1 Simulasi metode kurva batasan energi menggunakan software ETAP

Analisa selanjutnya adalah dengan mensimulasikan kondisi arus arcing dan durasi berlangsungnya sampai relay pengaman memutus gangguan (FCT).

Adapun plotting kurva batasan energi untuk level tegangan 1-15 kV adalah sebagai berikut :

Gambar 2.2 menjelaskan bahwa kurva paling kiri merupakan batas kategori paling rendah yaitu pada kategori 0, kemudian kurva paling kanan merupakan batas kategori paling tinggi yaitu kategori 4. Tingkat kategori-kategori ini ditentukan dari berapa besar insiden energi yang dihasilkan, semakin tinggi nilai arus-waktu nya maka semakin tinggi pula tingkat kategori dari PPE nya dan semakin tebal pula clothing yang dibutuhkan. Pada saat titik arus-waktu tersebut berada diatas kategori 0, PPE kategori 0 tidak cukup untuk mengatasi atau mengamankan gangguan yang terjadi. Maka dipilih PPE kategori 1 untuk mengamankan titik arus-waktu yang berada diatas kategori 0 dan dibawah kategori 1. Begitu pula untuk penjelasan gambar kurva selanjutnya baik kategori 1 – kategori 4.



**GAMBAR 2.2 KURVA BATASAN ENERGI PADA LEVEL TEGANGAN 1-15 kV**

### 2.6 Pengelompokan Tingkat Energi Arc-flash

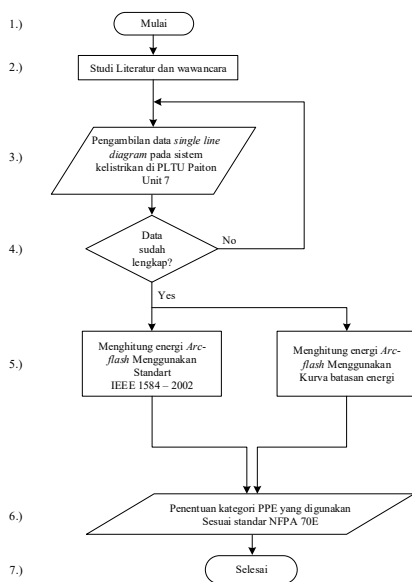
Berikut merupakan personel protective equipment (PPE) sesuai standar NFPA 70E – 2004 [7].

Level 0 1.2 cal/cm <sup>2</sup>	Level 1 4 cal/cm <sup>2</sup>	Level 2 8 cal/cm <sup>2</sup>	Level 3 25 cal/cm <sup>2</sup>	Level 4 40 cal/cm <sup>2</sup>

**GAMBAR 2.3 PENGELOMPOKAN TINGKAT ENERGI ARC-FLASH**

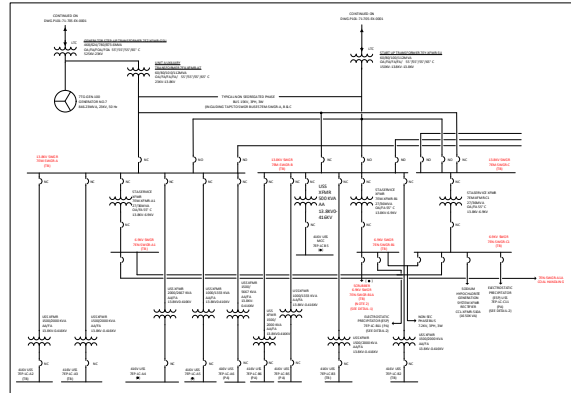
## 3. METODOLOGI PENELITIAN.

### 3.1 Digram alir penyelesaian penelitian



**GAMBAR 3.1 DIGRAM ALIR PENYELESAIAN PENELITIAN**

### 3.2 Gambar SLD sistem kelistrikan pada PT. POMI



**GAMBAR 3.2 GAMBAR SLD SISTEM KELISTRIKAN PADA PT. POMI**

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa yang dilakukan kali ini adalah untuk mengetahui nilai dari insiden energi *arc-flash* dengan menggunakan metode IEEE 1584-2002. Selain nilai insiden energi *arc-flash*, dari analisa ini juga akan didapatkan nilai *arcing current*, *flash protection boundary*, dan kategori dari nilai insiden energi *arc-flash*. Nilai – nilai tersebut akan digunakan sebagai dasar penentuan pemakaian *personal protective equipment* (PPE) yang harus digunakan petugas ketika menangani gangguan dengan menggunakan standar NFPA 70E.

Berikut ini adalah beberapa bus yang akan di analisa :

- 7EM-SWGR-A
- 7EM-SWGR-B
- 7EM-SWGR-C
- 7EN-SWGR-A1
- 7EN-SWGR-B1
- 7EN-SWGR-C1
- 7EN-SWGR-A1A
- 7EN-SWGR-B1A

### 4.1 Perhitungan Arc-flash Menggunakan Standart IEEE 1584-2002

Pada perhitungan *Arc-flash* menggunakan standart IEEE 15842002, yang harus diketahui sebelumnya adalah data mengenai arus gangguan *boltded* pada tiap bus yang dianalisa. Arus gangguan *boltded* merupakan arus hubung singkat tiga fasa,  $\frac{1}{2}$  cycle saat pembangkitan maksimum. Pada arus gangguan *boltded*, arus kontribusi dari beban juga diperhitungkan. Setelah mendapatkan data arus gangguan *boltded*, maka data selanjutnya yang harus diketahui adalah data FCT (*fault clearing time*) pada setiap bus tersebut. FCT merupakan waktu yang diperlukan relay untuk mengamankan gangguan.

Setelah dilakukan perhitungan untuk mencari arus *arcing*, energi normalisasi, insiden energi dan jarak kerja dengan menggunakan metode IEEE 1584-2002, maka kategori PPE yang sesuai dapat ditentukan. Hasil penentuan kategori bahaya/resiko dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut ini:



**TABEL 4.1 HASIL PERHITUNGAN ARC-FLASH MENGGUNAKAN STANDART IEEE 1584-2002:**

No	ID BUS	Arus Arcing (kA)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	PPE
1	7EM-SWGR-A	71,115	35,066	Kategori 4
2	7EM-SWGR-B	71,115	35,066	Kategori 4
3	7EM-SWGR-C	71,115	35,066	Kategori 4
4	7EN-SWGR-A1	38,654	23,706	Kategori 3
5	7EN-SWGR-B1	37,648	31,47	Kategori 3
6	7EN-SWGR-C1	36,063	27,962	Kategori 3
7	7EN-SWGR-A1A	38,654	16,551	Kategori 3
8	7EN-SWGR-B1A	37,648	17,491	Kategori 3

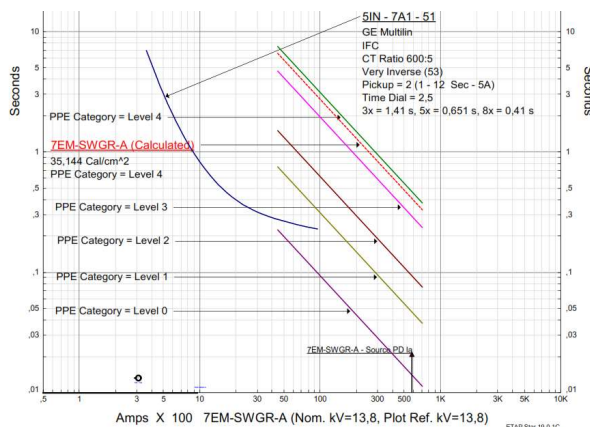
**4.2 Perhitungan Arc-flash Menggunakan Metode Kurva Batasan Energi**

Pada perhitungan Arc-flash menggunakan metode kurva batasan energi ini, hal yang harus dilakukan pertama kali adalah mendapatkan kurva setiap kategori PPE. Kurva ini menunjukkan hubungan arus – waktu, dan garis kurva ini didapatkan dari persamaan yang tetap mengacu pada IEEE 1584 – 2002.

**4.2.1 Penentuan Kurva Batasan Energi Pada Level Tegangan 1-15 kV**

Penentuan kategori personal protective device (PPE) pada salah satu contoh bus yang sering mengalami kejadian arc-flash yaitu pada bus 7EM-SWGR-A menggunakan Relay 5IN-7A1 yang digunakan sebagai referensi kurva batasan energi. Gambar 4.3 menunjukkan hasil plotting kurva relay 5IN-7A1 bahwa sebagian kurva relay 5IN-7A1 berada dibawah kurva batasan energi kategori 4. Titik tersebut berada diatas kategori 3, sehingga PPE kategori 3 tidak cukup untuk mengatasi atau mengamankan gangguan yang terjadi pada bus 7EM-SWGR-A. Maka dipilih PPE kategori 4 untuk mengamankan bus 7EM-SWGR-A. Jarak aman maksimum untuk daerah bus 7EM-SWGR-A adalah pada 96,5 feet.

Setelah dilakukan perhitungan untuk mencari arus arcing, energi normalisasi, insiden energi dan jarak kerja dengan menggunakan metode IEEE 1584-2002, maka kategori PPE yang sesuai dapat ditentukan. Hasil penentuan kategori bahaya/resiko dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini:



**GAMBAR 4.1 KURVA BATASAN ENERGI PADA LEVEL TEGANGAN 1-15 kV**

**TABEL 4.2 HASIL PERHITUNGAN ARC-FLASH MENGGUNAKAN METODE KURVA BATASAN ENERGI**

No	ID BUS	Arus Arcing (kA)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	PPE
1	7EM-SWGR-A	71,126	35,14	Kategori 4
2	7EM-SWGR-B	71,126	35,14	Kategori 4
3	7M-SWGR-C	71,126	35,14	Kategori 4
4	7EN-SWGR-A1	37,128	17,4	Kategori 3
5	7EN-SWGR-B1	38,109	24,41	Kategori 3
6	7EN-SWGR-C1	33,303	19,66	Kategori 3
7	7EN-SWGR-A1A	37,128	12,12	Kategori 3
8	7EN-SWGR-B1A	38,109	13,56	Kategori 3

**4.3 Perbandingan Antara Perhitungan Menggunakan IEEE 1584 2002 dan Menggunakan Kurva Batasan Energi**

Pada sub bab ini akan menganalisa tentang perbandingan antara hasil perhitungan menggunakan IEEE 1584-2002 dan hasil perhitungan kurva batasan energi. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.6 dan 4.7 berikut:

**TABEL 4.3 PERBANDINGAN ARUS ARCING (kA) ANTARA IEEE 1584-2002 DENGAN KURVA BATASAN ENERGI**

No	Bus ID	IEEE 1584-2002	Kurva Batasan Energi
1	7EM-SWGR-A	71,115	71,126
2	7EM-SWGR-B	71,115	71,126
3	7EM-SWGR-C	71,115	71,126
4	7EN-SWGR-A1	38,654	37,128
5	7EN-SWGR-B1	37,648	38,109
6	7EN-SWGR-C1	36,063	33,303
7	7EN-SWGR-A1A	38,654	37,128
8	7EN-SWGR-B1A	37,648	38,109

**TABEL 4.4 PERBANDINGAN INSIDEN ENERGI (CAL/CM2) ANTARA IEEE 1584-2002 DENGAN KURVA BATASAN ENERGI**

No	Bus ID	IEEE 1584-2002	Kurva Batasan Energi
1	7EM-SWGR-A	35,066	35,14
2	7EM-SWGR-B	35,066	35,14
3	7EM-SWGR-C	35,066	35,14
4	7EN-SWGR-A1	23,706	17,4
5	7EN-SWGR-B1	31,47	24,41
6	7EN-SWGR-C1	27,962	19,66
7	7EN-SWGR-A1A	16,551	12,12
8	7EN-SWGR-B1A	17,491	13,56

**TABEL 4.5 PERBANDINGAN HASIL KATEGORI PPE ANTARA IEEE 1584-2002 DENGAN KURVA BATASAN ENERGI**

No	ID BUS	IEEE 1584-2002	Kurva Batasan Energi
1	7EM-SWGR-A	Kategori 4	Kategori 4
2	7EM-SWGR-B	Kategori 4	Kategori 4
3	7EM-SWGR-C	Kategori 4	Kategori 4

4	7EN-SWGR-A1	Kategori 3	Kategori 3
5	7EN-SWGR-B1	Kategori 3	Kategori 3
6	7EN-SWGR-C1	Kategori 3	Kategori 3
7	7EN-SWGR-A1A	Kategori 3	Kategori 3
8	7EN-SWGR-B1A	Kategori 3	Kategori 3

Dari Tabel 4.3, 4.4, dan 4.5 menjelaskan bahwa metode kurva Batasan energi menunjukkan hasil yang hampir serupa sama dengan metode pembandingnya.

## 5. Kesimpulan

1. Metode kurva batasan energi dapat menyederhanakan perhitungan *Arc-flash* untuk industri besar yang memiliki banyak bus. Karena dalam penentuan PPE menggunakan metode ini cukup melihat kurva dari relay/fuse kemudian di plotkan kedalam kurva batasan energi sehingga didapat kategori PPE yang diperlukan.
2. Metode kurva batasan energi menunjukkan kategori PPE yang sama dengan metode pembandingnya.
3. Di seluruh Medium Voltage *Switchgear* yang ada di lingkungan PLTU Paiton Unit 7 yang memiliki tegangan nominal sebesar 13,8 kV dan 6,9 kV memperoleh hasil Analisa *Arc-flash* dan kategori PPE yang tidak melebihi batas maksimal level PPE dikarenakan koordinasi proteksi yang tepat dan sudah sesuai standar sekaligus sesuai dengan perhitungan dari persamaan arus hubung singkat dan waktu pemutusan breaker (FCT). Adapun beberapa hal yang dapat memitigasi suatu kejadian *Arc-flash* antara lain: penggunaan peralatan yang tepat, setting relai yang optimal, dan pemeliharaan rutin.

## Referensi

- [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, Sep. 2016, doi: 10.12962/J23373539.V5I2.16167.
- [2] M. I. Taufiqi, M. Pujiantara, S. Anam, and J. T. Elektro, "Analisa Arc Flash pada Sistem Kelistrikan Di PT. Asahimas Flat Glass Tbk. Sidoarjo," *J. Tek. ITS*, vol. 6, no. 1, pp. F184–F190, Mar. 2017, doi: 10.12962/J23373539.V6I1.22545.
- [3] P. Kusalya, P. A. S. Kusalya, M. Pujiantara, and O. Penangsang, "Simplifikasi Analisa Bahaya Arc Flash Menggunakan Metode Kurva Batasan Energi pada PT. Pertamina RU VII Syarif Kasim," *J. Tek. ITS*, vol. 12, no. 1, pp. B29–B35, May 2023, doi: 10.12962/j23373539.v12i1.110746.
- [4] J. K. Sugiharto and S. Abduh, "ANALISIS ARC FLASH 6,3 KV PT HOLCIM INDONESIA TBK. BOGOR, JAWA BARAT," *Jetri J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 16, no. 1, pp. 29–38, Aug. 2018, doi: 10.25105/JETRI.V16I1.2939.
- [5] Y. Firdaus, M. Pujiantara, and A. Musthofa, "PENYEDERHANAAN ANALISA BAHAYA ARC FLASH MENGGUNAKAN KURVA BATASAN ENERGI PADA BANDARA INTERNASIONAL JUANDA," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. B217–B222, Sep. 2016, doi: 10.12962/J23373539.V5I2.16121.
- [6] M. Maulana, S. Sulistyono, and F. Farsa, "Pengaruh Setting OCR Terhadap Arc Flash Saat Short Circuit Penyulang AK19 Substation Diesel PT KDL," *J. Teknol. Elektro*, vol. 14, no. 2, p. 78, 2023, doi: 10.22441/jte.2023.v14i2.004.
- [7] C. Velimir Lackovic, "Arc Flash Calculation Methods," no. 877, p. 34.
- [8] Srinivasan, R., and L. Amarnath. "Arc Flash Risk Assessment for Electrical Safety in Industrial Systems." *IEEE Transactions on Industry Applications* 50, no. 3 (2014): 2071-2079.
- [9] Ammerman, Robert F., et al. "Comparison of Methods for Arc Flash Hazard Calculations in Data Centers." *IEEE Transactions on Industry Applications* 54, no. 1 (2018): 301-309.
- [10] Huang, Yanfeng, and Yijia Cao. "Quantitative Risk Assessment of Arc Flash in Low Voltage Power Systems." *IEEE Transactions on Power Delivery* 29, no. 6 (2017): 2436-2442.
- [11] Harijanto, Priya Surya, and Budi Eko Prasetyo. "Analisa Proteksi Gangguan Petir Pada SUTT 70 KV Antara GI Kebonagung - Polehan." *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan* 10, no. 1 (2023): 13-18. DOI: 10.33795/elposys.v10i1.975
- [12] Harijanto, Priya Surya, Wijaya Kusuma, Budi Eko Prasetyo, Ahmad Hermawan, and Alif Fitrah. "Analisis Perbaikan Sistem Pentanahan Pada Tower Transmisi 150 KV Menggunakan Simulasi Alternative Transient Program (ATP)." *Jurnal Teknik Ilmu dan Aplikasi* 3, no. 1 (2022): 61-68
- [13] Harijanto, Priya Surya, M.F. Hakim, R.A. Ananto, A.H. Santoso. "Voltage Improvement on the Feeder Using the Load Breaking Method." *International Journal of Electrical Engineering and Applied Sciences*, 2023.\
- [14] Su, Wenqi, et al. "Arc Flash Hazard Analysis for Utility-scale Solar Power Plants." *IEEE Transactions on Power Delivery* 33, no. 5 (2018): 2147-2154.
- [15] Suwito, Suhanto, dan Kustori, "Sistem Baterai Charging pada Solar Energy System dengan Buck Boost Converter untuk Berbagai Tingkat Pencahayaan di Bandar Udara," Institut Teknologi Sepuluh Noverber, Surabaya, 2017.