
PERHITUNGAN SISTIM PENAGKAL PETIR INTERNAL PADA GEDUNG APARTEMEN UTTARA THE ICON

Danang Aprili Anwar Jaya^{*1}, Diah Suwarti², Tugino³
Jalan Babarsai, Caturtunggal, Depok, Sleman, DIY, 55281

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro SI, Fakultas Teknik dan Perancangan ITNY, Yogyakarta
e-mail: ¹312218039@students.itny.ac.id, ²diahsuwarti@itny.ac.id, ³tugino@itny.ac.id

Abstrak

Petir merupakan ancaman serius bagi keandalan sistem kelistrikan, terutama di daerah dengan kerapatan sambaran tinggi seperti Yogyakarta yang memiliki tingkat kerapatan petir mencapai 90 flash/km²/tahun [1]. Penelitian ini membahas proteksi petir internal di Apartemen Utara The Icon untuk memitigasi risiko kerusakan peralatan akibat sambaran langsung dan lonjakan tegangan. Berdasarkan analisis risiko menurut IEC 62305-2 [2], nilai risiko bangunan ini mencapai 2,016 yang jauh melebihi ambang batas aman sebesar 1,0 sehingga memerlukan sistem proteksi komprehensif sesuai standar IEC 62305-4 [3] untuk proteksi struktur dan IEC 61643-11 [4] untuk perangkat proteksi tegangan lebih. Metode penelitian menggunakan pendekatan Lightning Protection Level (LPL) I dengan arus petir rencana 200 kA [5] dan menerapkan konsep Lightning Protection Zones (LPZ) [6] berbasis Surge Protective Device (SPD) bertingkat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem proteksi berlapis dengan SPD Tipe 1 ($I_{imp} \geq 50$ kA) di panel utama, SPD Tipe 2 ($I_n = 40$ kA) di sub-panel, dan SPD Tipe 3 ($U_p \leq 1$ kV) di panel akhir mampu memberikan perlindungan menyeluruh dari sambaran langsung hingga gangguan residu. Pendekatan ini secara efektif menjamin keamanan peralatan sensitif di dalam gedung terhadap ancaman petir. Studi ini sekaligus menegaskan pentingnya desain proteksi petir yang komprehensif berbasis standar internasional untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di daerah rawan petir seperti Yogyakarta [7].

Kata kunci: Lightning Protection Level (LPL), Surge Protective Device (SPD), Lightning Protection Zones (LPZ), arus petir rencana, tegangan limpasan.

Abstract

Lightning poses a serious threat to the reliability of electrical systems, particularly in high lightning density areas such as Yogyakarta, which experiences a lightning flash density of up to 90 flashes/km²/year [1]. This study examines the internal lightning protection system of the Utara The Icon Apartment to mitigate equipment damage risks caused by direct strikes and voltage surges. Based on risk assessment according to IEC 62305-2 [2], the building's risk value reaches 2.016, far exceeding the safety threshold of 1.0, necessitating a comprehensive protection system in compliance with IEC 62305-4 [3] for structural protection and IEC 61643-11 [4] for surge protective devices (SPDs). The research methodology adopts Lightning Protection Level (LPL) I with a design lightning current of 200 kA [5] and implements a Lightning Protection Zones (LPZ) approach [6] using a multi-stage SPD system. The findings demonstrate that a layered protection system—comprising Type 1 SPD ($I_{imp} \geq 50$ kA) at the main panel [7], Type 2 SPD ($I_n = 40$ kA) at sub-panels, and Type 3 SPD ($U_p \leq 1$ kV) at terminal panels—provides comprehensive protection from direct strikes to residual disturbances. This approach effectively safeguards sensitive equipment within the building against lightning threats. The study also reaffirms the importance of a comprehensive lightning protection design based on international standards to enhance power system reliability in lightning-prone regions like Yogyakarta [7].

Keywords: *Lightning Protection Level (LPL), Surge Protective Device (SPD), Lightning Protection Zones (LPZ), design lightning current, voltage protection level*

1. PENDAHULUAN

Fenomena petir (lightning) menjadi ancaman signifikan terhadap stabilitas sistem tenaga listrik, khususnya pada struktur gedung bertingkat dengan area eksposur yang luas terhadap sambaran langsung maupun induksi elektromagnetik [8]. Sambaran petir dapat menghasilkan transien tegangan (voltage surge) yang berpotensi menyebabkan kerusakan fatal pada peralatan elektrik, sistem kontrol, dan infrastruktur elektronik pendukung. Wilayah Yogyakarta, lokasi berdirinya Apartemen Utara The Icon, memiliki tingkat aktivitas kilat yang tinggi dengan kerapatan sambaran mencapai 90 strike/km²/tahun [1], sehingga memerlukan implementasi sistem proteksi petir internal yang komprehensif dan memenuhi standar teknis.

Standar IEC 62305-4:2010 [3] merekomendasikan pendekatan Lightning Protection Zones (LPZ) sebagai solusi optimal, di mana perangkat Surge Protective Device (SPD) diintegrasikan secara bertingkat (graded protection) mulai dari titik masuk energi (LPZ 0) hingga ke beban akhir (LPZ 2 atau lebih tinggi) [5]. Namun, sistem distribusi daya di Apartemen Utara The Icon saat ini belum sepenuhnya menerapkan konsep gradasi SPD [9], sehingga risiko penetrasi transien tegangan ke perangkat sensitif masih tinggi. Kondisi ini dapat mengakibatkan kegagalan sistemik dan kerugian finansial yang signifikan akibat kerusakan peralatan [10].

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan spesifikasi teknis perangkat SPD yang optimal untuk diterapkan pada panel utama (LVMDP), sub-panel (SDP), dan sub-sub-panel (Sub-SDP) di Apartemen Utara The Icon. Penentuan dilakukan berdasarkan pendekatan LPZ dan mengacu pada standar internasional IEC 62305-4 [3] dan IEC 61643-11 [4], dengan mempertimbangkan tingkat perlindungan petir (Lightning Protection Level/LPL) sebagai dasar dalam menentukan spesifikasi dari masing-masing SPD. Dengan demikian, diharapkan sistem proteksi internal yang dirancang mampu meminimalkan tegangan residual serta melindungi peralatan terhadap dampak destruktif dari lonjakan akibat sambaran petir [11].

2. METODE PENELITIAN

Apartemen Utara The Icon, dengan 18 lantai dan tinggi bangunan 59 meter, berada di wilayah rawan petir dengan kerapatan sambaran tahunan (N_g) sebesar 90 hari guruh [1]. Saat ini, sistem proteksi petir internal gedung ini belum sepenuhnya memenuhi standar karena hanya dilengkapi SPD Tipe 2 (I_n 20 kA, $U_p < 1,3$ kV) pada panel distribusi (SDP), tanpa adanya SPD Tipe 1 pada panel utama (LVMDP) dan SPD Tipe 3 pada sub-panel. Kedua tipe SPD tersebut diperlukan untuk meredam arus impuls petir dan melindungi peralatan sensitif. Oleh karena itu, diperlukan analisis teknis untuk menentukan spesifikasi SPD yang optimal sesuai IEC 62305-4 [3].

Metode penelitian disusun dalam dua tahap utama, yaitu studi literatur-pengumpulan data, dan analisis teknis melalui pendekatan perhitungan berdasarkan standar IEC 62305 dan IEC 61643. Tahap pengumpulan data bertujuan untuk memperoleh parameter teknis yang diperlukan dalam perhitungan dan evaluasi sistem proteksi. Data yang dikumpulkan dikelompokkan menjadi empat kategori utama:

1. Data lingkungan: Nilai kerapatan sambaran petir tahunan (*isokeraunic level*) diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), dan digunakan untuk menentukan tingkat risiko petir berdasarkan lokasi geografis. Data pada Tabel 1. dapat menjadi dasar dalam penentuan Lightning Protection Level (LPL).

Table 1. Data hari guruh BMKG

Parameter	Nilai
Data IKL – Hari Guruh Rata-Rata per Tahun (f_g)	≈ 90 flash/km ² /tahun
Letak Geografis – Garis Lintang (Lat)	-7.75° LS

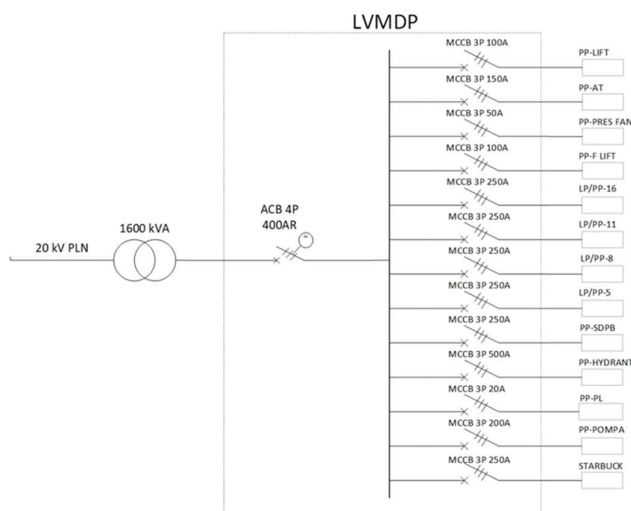
Letak Geografis – Garis Bujur (Lon)	110.36° BT
Curah Hujan Rata-Rata per Tahun	≈ 2175 mm/tahun
Tinggi Awan Terendah (Ha)	~ 300–400 m
Tinggi di Atas Permukaan Laut (Elevasi)	≈ 210 m dpl

2. Data bangunan: Informasi mengenai jumlah lantai, tinggi bangunan, luas area, serta fungsi ruang dikumpulkan untuk menentukan pembagian zona LPZ dan kebutuhan tingkat proteksi. Data dimensi gedung dapat dilihat pada Tabel 2.

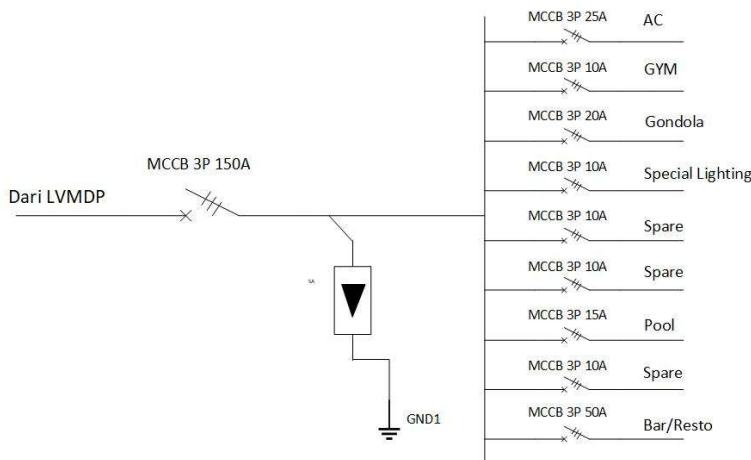
Table 2. Dimensi gedung

Parameter	Nilai (m)
Tinggi (h):	59
Panjang (L):	63,85
Lebar (W):	21,55

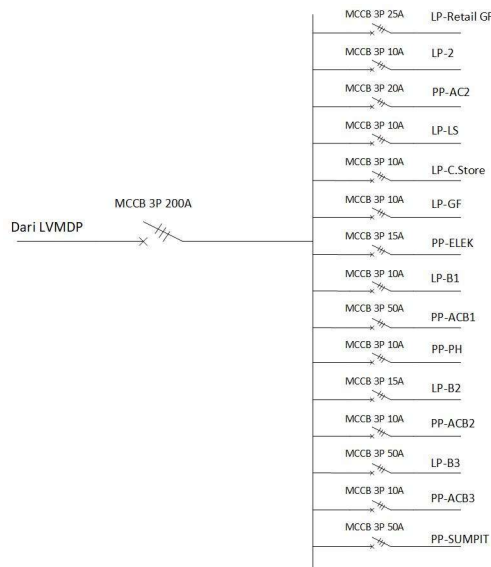
3. Data sistem kelistrikan: Data mencakup single line diagram, lokasi panel distribusi (LVMDP ditunjukkan pada Gambar 1, SDP ditunjukkan pada Gambar 3., dan sub-SDP ditunjukkan pada Gambar 4.). Informasi ini digunakan untuk mengidentifikasi titik-titik kritis kemungkinan masuknya arus impuls ke dalam sistem.



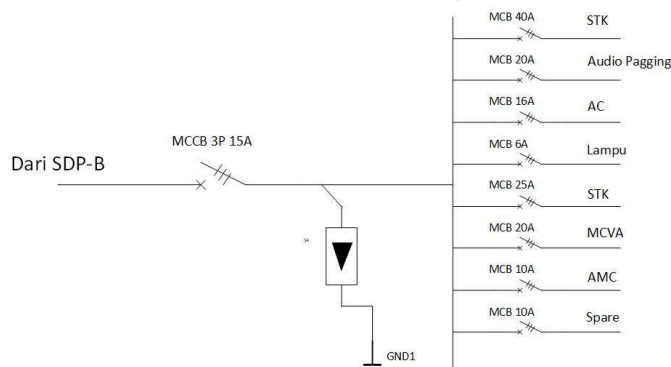
Gambar 1. Diagram satu garis sistem distribusi listrik Gedung



Gambar 2. Diagram satu garis panel power AT



Gambar 3. Diagram satu garis panel SDP-B



Gambar 4. Diagram satu garis panel ELEK (R. Kontrol)

4. Data proteksi eksisting pada Tabel 3.: Meliputi spesifikasi teknis SPD yang telah terpasang, seperti jenis SPD (Tipe 1, 2, atau 3), arus nominal (I_n), arus maksimum (I_{max}), tegangan kerja kontinu (U_c), dan tegangan residu (U_p). Evaluasi terhadap data ini dilakukan untuk menilai kesesuaian dengan prinsip graded protection dan koordinasi antar SPD yang dipersyaratkan dalam standar IEC.

Table 3. Data SPD terpasang

Lokasi Pemasangan	Komponen Proteksi	Spesifikasi
Panel Power AT	SDP Tipe 2	U_c : 280VAC I_n (8/20): 20kA I_{max} : 40kA U_p : <1,3kV
Panel Elek GF	SDP Tipe 2	U_c : 280VAC I_n (8/20): 20kA I_{max} : 40kA U_p : <1,3kV

Analisis dilakukan secara sistematis melalui pendekatan perhitungan berdasarkan konsep LPZ dan klasifikasi SPD yang diatur dalam standar IEC 62305-4 [3] dan IEC 61643-11 [4]. Langkah-langkah utama analisis meliputi:

1. Penentuan Tingkat Proteksi (LPL)

Berdasarkan nilai N_g yang tinggi (90 hari guruh per tahun), dilakukan klasifikasi risiko petir sesuai IEC 62305-1 untuk menentukan LPL yang relevan dan besaran arus impuls petir yang harus ditahan oleh sistem.

Table 4. Kriteria pemilihan Level Proteksi Petir (LPL) IEC 62305-1 [12]

Parameter	LPL I	LPL II	LPL III-IV
Arus Petir (I_{peak})	200 kA (10/350 μ s)	150 kA	100 kA
Frekuensi Sambaran Tahunan	$N_D > 1$	$0.1 < N_D \leq 1$	$N_D \leq 0.1$

2. Identifikasi Zona Proteksi Petir (LPZ)

Pembagian zona dilakukan berdasarkan posisi panel dalam sistem distribusi listrik [13], yaitu:

 - a. LVMDP sebagai batas antara LPZ 0 dan LPZ 1
 - b. SDP sebagai batas antara LPZ 1 dan LPZ 2
 - c. Sub-SDP sebagai bagian dari LPZ 3 atau titik beban akhir
3. Penentuan dan Spesifikasi SPD

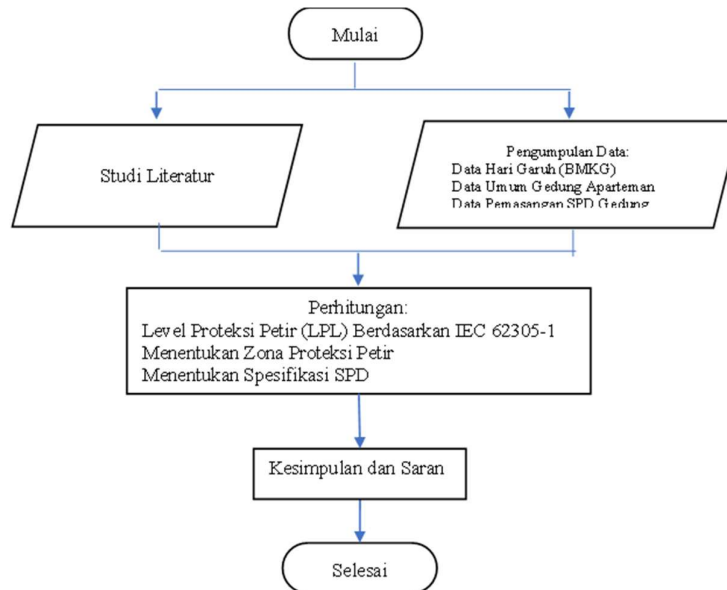
Pemilihan SPD pada setiap zona ditentukan berdasarkan beban arus impuls, batas tegangan sistem, serta kemampuan koordinasi antar perangkat. Rincian spesifikasi adalah sebagai berikut [14]:

 - a. SPD Tipe 1 pada LVMDP

Dirancang untuk meredam arus impuls dari sambaran langsung dengan bentuk gelombang 10/350 μ s. SPD ini dipilih dengan kapasitas arus limp sesuai LPL dan U_c yang sesuai dengan tegangan sistem (380/220 V, TN-S) [15]. Tegangan residu (U_p) dari SPD Tipe 1 menjadi acuan dalam pemilihan SPD Tipe 2.
 - b. SPD Tipe 2 pada SDP

Berfungsi membatasi lonjakan residual dari SPD Tipe 1. SPD ini bekerja terhadap arus bentuk gelombang 8/20 μ s dan dipilih dengan memperhatikan nilai I_n serta U_p yang lebih rendah dari *Basic Insulation Level* (BIL) peralatan *downstream* [16]. Koordinasi energi dengan SPD Tipe 1 sangat penting untuk menjamin efektivitas proteksi berlapis.
 - c. SPD Tipe 3 pada sub-SDP

Digunakan untuk melindungi peralatan elektronik sensitif. SPD ini harus memiliki waktu respons sangat cepat dan U_p yang sangat rendah (lebih kecil dari BIL peralatan), serta ditempatkan sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi untuk meminimalkan efek induktansi kabel [17].



Gambar 5. Diagram penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan standar IEC 62305-4 (*Protection against lightning*) [3] dan IEC 61643-11 (*Low-voltage SPD*) [4], perancangan SPD harus mempertimbangkan level proteksi, zona proteksi (LPZ), klasifikasi risiko, dan parameter teknis seperti arus implus (I_{imp}), arus maksimal (I_{max}), arus nominal (I_n), tegangan oprasional (U_C), dan tegangan proteksi (U_p).

3.1 Klasifikasi level proteksi (LPL) berdasarkan IEC 62305-1

Data Bangunan dan Lingkungan

Kerapatan sambaran petir (N_g): 90 flash/km²/tahun

Perhitungan Probabilitas Sambaran Petir (Eksposur Bangunan)

a. Luas Ekuivalen Bangunan (A_e)

Berdasarkan IEC 62305-2, luas ekuivalen dihitung dengan Persamaan (2.38):

$$A_e = L \cdot W \cdot 2 \cdot (L \cdot W) \cdot h + \pi h^2$$

$$A_e = 63,85.21,55.2 \cdot (63,85.21,55) \cdot 59 + \pi 59^2$$

$$A_e = 2389,05 \text{ m}^2$$

b. Frekuensi Sambaran Tahunannya (N_D)

Dihitung menggunakan Persamaan (2.39) maka:

$$N_D = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6}$$

$$N_D = 90.2389,05 \cdot 10^{-6}$$

$$N_D = 2,016 \text{ sambaran/tahun}$$

Sehingga berdasarkan perhitungan diatas gedung aparteman Utara The Icon memenuhi kriteria LPL I dengan paramater:

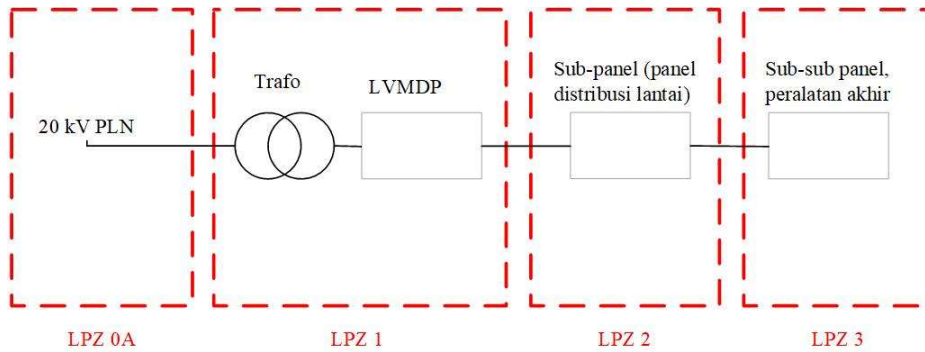
- Arus puncak (I_{peak}) 200 kA (10/350µs)
- Wajib menggunakan SPD Tipe 1 *Class I*

3.1 Menentukan zona proteksi petir

Pembagian zona proteksi petir (Lightning Protection Zones/LPZ) berdasarkan IEC 62305-4 [3] merupakan pendekatan sistematis untuk mereduksi dampak sambaran petir pada instalasi kelistrikan. LPZ 0A adalah zona paling luar yang terekspos langsung terhadap sambaran petir dan medan elektromagnetik penuh. Ketika arus petir memasuki sistem melalui jaringan atau transformator, proteksi dilanjutkan ke LPZ 1—area seperti ruang trafo dan LVMDP—yang bebas dari sambaran langsung namun tetap menerima arus surja besar akibat induksi elektromagnetik. Di zona ini, SPD tipe 1 dipasang untuk meredam arus impuls utama (10/350 µs) . Distribusi ke sub-panel melewati LPZ 2, yang memerlukan SPD tipe 2 guna meredam sisa lonjakan (8/20 µs). Zona akhir LPZ 3 melindungi peralatan sensitif, dengan SPD tipe 3 yang memiliki respons cepat dan tegangan limpasan rendah. Strategi proteksi berlapis melalui pembagian LPZ memungkinkan sistem kelistrikan terlindungi secara komprehensif dan terkoordinasi, zona proteksinya dapat dilihat pada Tabel 5.

Table 5. Pembagian Zona Proteksi Petir

Zona	Lokasi	Karakteristik	Proteksi
LPZ 0A	Luar bangunan / jaringan PLN	Terkena sambaran langsung dan medan EM penuh	Sistem LPS eksternal (penangkal petir)
LPZ 1	Trafo distribusi & panel utama LVMDP	Arus masuk besar dari sambaran luar atau induksi	Pasang SPD Tipe 1 (arus petir)
LPZ 2	Sub-panel (panel distribusi lantai)	Masih ada lonjakan tapi lebih kecil dari LPZ 1	Pasang SPD Tipe 2
LPZ 3	Sub-sub panel, peralatan akhir	Medan EM sangat rendah, risiko lonjakan kecil	Pasang SPD Tipe 3



Gambar 6. Zona proteksi petir pada Apartemen Utara The Icon

3.3 Penentuan spesifikasi SPD

A. Spesifikasi SPD Tipe 1 (Class I) di LVMDP

Fungsi: Menangkap arus petir langsung.

a. Arus Impuls (I_{imp})

Berdasarkan IEC 62305-1, arus petir untuk LPL I:

$$I_{imp} = \frac{I_{peak}}{n}$$

$$I_{imp} = \frac{200}{4}$$

$$I_{imp} = 50 \text{ kA (10/350}\mu\text{s)}$$

sehingga dipilih SDP dengan $I_{imp} \geq 50 \text{ kA (10/350 } \mu\text{s)}$

b. Arus Maksimum (I_{max}) dan Arus Pengenal (I_n)

$$I_{max} (8/20 \mu\text{s}): \geq 100 \text{ kA}$$

$$I_n (8/20 \mu\text{s}): \geq 25 \text{ kA}$$

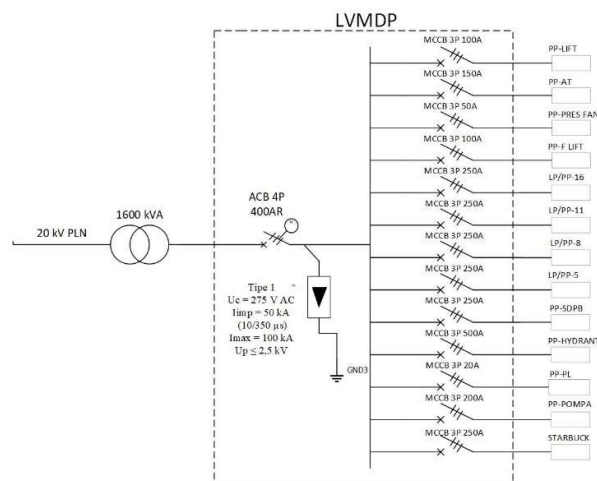
c. Tegangan Maksimum (U_C) dan Tegangan Proteksi (U_P)

$$U_C \geq 1,15 \times U_{L-N} = 1,15 \times 220 = 275 \text{ V}$$

$$U_C \geq 1,15 \times U_{L-L} = 1,15 \times 380 = 440 \text{ V}$$

$$U_C = 275/440 \text{ V}$$

$$U_P \leq 2,5 \text{ kV}$$



Gambar 7. Diagram satu garis SPD di LVMDP

Table 6. Spesifikasi SPD berdasarkan lokasi pemasangan

Lokasi Pemasangan	Zona LPZ	Tipe/Class SPD	Spesifikasi SPD	Fungsi Utama
LVMDP	LPZ 0 → LPZ 1	Tipe 1 Class I	$I_{imp} = 50 \text{ kA}$ (10/350 μs), $I_{max} = 100 \text{ kA}$ (8/20 μs), $I_n = 25 \text{ kA}$ (8/20 μs), $U_c = 275/440 \text{ V}$, $U_p \leq 2,5 \text{ kV}$.	Menahan arus impuls besar akibat petir langsung atau induksi luar
SDP	LPZ 1 → LPZ 2	Tipe 2 Class II	$I_{max} = 40 \text{ kA}$ (8/20 μs), $I_n = 20 \text{ kA}$ (8/20 μs), $U_c = 275/440 \text{ V}$ $U_p \leq 1,5 \text{ kV}$.	Menahan sisa lonjakan dari hulu dan <i>switching</i> internal
Sub SDP	LPZ 2 → LPZ 3	Tipe 3 Class III	$I_n = 10 \text{ kA}$ (8/20 μs), $U_c = 275 \text{ V}$ $U_p \leq 1,0 \text{ kV}$.	Perlindungan presisi untuk perangkat sensitif

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil analisis sistem distribusi listrik dan karakteristik sambaran petir pada Gedung Apartemen Utara The Icon, sebagai berikut:

- SPD Tipe 1 (untuk panel utama/LVMDP): Dipasang pada transisi zona perlindungan petir dari LPZ 0A ke LPZ 1, berfungsi untuk meredam arus petir langsung yang masuk melalui sistem suplai listrik. Spesifikasi SDP:
 - Arus impuls (I_{imp}) = 50 kA (gelombang 10/350 μs)
 - Arus maksimum (I_{max}) = 100 kA
 - Arus Nominal (I_n) = 25 kA
 - Tegangan operasi (U_c) = 275/440 V
 - Tegangan proteksi (U_p) $\leq 2,5 \text{ kV}$
- SPD Tipe 2 (untuk sub-panel/SDP): Dipasang pada transisi dari LPZ 1 ke LPZ 2, bertugas meredam tegangan lebih residu yang diteruskan dari SPD Tipe 1. Spesifikasi SDP:
 - Arus maksimum (I_{max}) = 40 kA
 - Arus Nominal (I_n) = 20 kA
 - Tegangan operasi (U_c) = 275/440 V
 - Tegangan proyeksi (U_p) $\leq 1,5 \text{ kV}$
- SPD Tipe 3 (untuk panel akhir/Sub-SDP): Dipasang pada transisi dari LPZ 2 ke LPZ 3, untuk melindungi peralatan elektronik sensitif dari tegangan lebih transien sisa. Spesifikasi SDP:
 - Arus nominal (I_n) = 10 kA,
 - Tegangan operasi (U_c) = 275 V
 - Tegangan proteksi (U_p) $\leq 1,5 \text{ kV}$

-
4. Kelebihan
Studi ini memberikan spesifikasi teknis SPD yang disesuaikan dengan struktur zona proteksi LPZ berdasarkan IEC 62305-4. Pemilihan SPD telah mempertimbangkan bentuk gelombang arus petir dan tingkat perlindungan yang dibutuhkan di tiap level panel.
 5. Kekurangan
Analisis dilakukan berdasarkan pendekatan teoritis tanpa didukung data pengukuran lapangan, serta belum mempertimbangkan variasi parameter sistem seperti konfigurasi pentanahan atau nilai impedansi aktual.
 6. Pengembangan Selanjutnya
Diperlukan validasi eksperimental dan simulasi numerik untuk mengevaluasi efektivitas koordinasi energi antar SPD. Penelitian lanjutan juga dapat mencakup aspek ekonomi untuk menilai rasionalitas biaya proteksi bertingkat di bangunan bertingkat tinggi.

5. SARAN

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan yang dapat dijadikan dasar untuk pengembangan studi selanjutnya. Oleh karena itu, saran-saran untuk penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

- a. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengembangkan model simulasi transien berbasis perangkat lunak guna memverifikasi efektivitas koordinasi antar SPD dalam berbagai skenario sambaran petir dan konfigurasi sistem distribusi.
- b. Perlu dilakukan studi eksperimental atau pengukuran langsung terhadap performa SPD pada bangunan bertingkat nyata, khususnya dalam kondisi sambaran petir aktual, untuk melengkapi pendekatan berbasis perhitungan teoritis.
- c. Penelitian selanjutnya dapat memperluas ruang lingkup pada analisis pengaruh impedansi sistem pentanahan terhadap kinerja SPD dalam membatasi tegangan lebih dan distribusi arus impuls antar zona LPZ.
- d. Perlu juga dieksplorasi pemodelan biaya-manfaat (cost-benefit analysis) dari sistem proteksi bertingkat menggunakan SPD, agar hasil rekomendasi teknis dapat diperkuat dengan justifikasi ekonomi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BMKG, Data Monitoring Petir Wilayah Yogyakarta, Yogyakarta: BMKG, 2023.
 - [2] IEC, IEC 62305-2, "Protection Against Lightning - Part 2: Risk Management, IEC, 2010.
 - [3] IEC, IEC 62305-4, "Protection Against Lightning - Part 4: Electrical and Electronic Systems Within Structures, 2010.
 - [4] IEC, IEC 61643-11, "Low-Voltage Surge Protective Devices - Part 11: Requirements and Test Methods, 2011.
 - [5] A. Rousseau, "Advanced Lightning Protection Systems," *IEEE Trans*, vol. 30, no. 3, pp. 1234-1242, 2015.
 - [6] M. Darveniza, "Lightning Protection Zones Theory and Applications," *J. Electrostat*, vol. 65, pp. 401-408, 2007.
 - [7] S. Visacro, "Lightning Protection of Modern Buildings," *IEEE Trans*, vol. 48, no. 2, pp. 798-805, 2012.
 - [8] M. A. Uman, The lightning discharge, New York: Academic Press, 1987.
-

-
- [9] S. Yokoyama, "Lightning protection of buildings in Japan," *IEEE Trans*, vol. 102, no. 2, pp. 1724-1731, 1983.
- [10] M. Darveniza, "A practical extension of the application of lightning protection zones theory," *IEEE Trans*, vol. 22, no. 1, pp. 300-307, 2007.
- [11] V. A. R. a. M. A. Uman, *Lightning: Physics and effects*, 2003: Cambridge University Press, Cambridge.
- [12] IEC, IEC 62305-1, "Protection against lightning - Part 1: General principles, IEC, 2010.
- [13] A. Rousseau, "LPZ concept for building protection," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 34, no. 2, pp. 789-797, 2019.
- [14] F. D'Alessandro, *Surge Protection for Power Systems*, Wiley, 2016.
- [15] I. C62.41.1, *IEEE Guide on the Surge Environment in Low-Voltage AC Power Circuits*, 2001.
- [16] I. 60664-1, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems*, 2020.
- [17] DEHN, *DEHNguard Series SPD Technical Manual*, 2022.
-