

Evaluasi Sistem Proteksi Petir Eksternal pada Bangunan Pusat Perbelanjaan Studi Kasus Gedung XYZ

Athaya Mahira¹, Aji Nur Widyanto², Faiz Husnayain³, dan Ismi Rosyiana Fitri⁴
^{1,2,3,4}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus UI – Depok, Jawa Barat 16424, Indonesia
e-mail: athaya.mahira@ui.ac.id

Abstrak—Sustainable Development Goals (SDGs) adalah 17 tujuan global yang disusun oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk mengatasi berbagai tantangan global seperti kemiskinan, degradasi lingkungan, perdamaian, dan perubahan iklim. Salah satu tujuannya adalah poin 11, "*sustainable cities and communities*," yang bertujuan membuat kota dan pemukiman manusia inklusif, aman, tangguh, dan berkelanjutan. Indonesia, dengan iklim tropisnya, rentan terhadap hujan petir yang bisa menyebabkan kerusakan elektronik, cedera, kematian, dan kebakaran. Dengan Indeks Kerawanan Petir (IKL) 45%, Jakarta adalah salah satu kota dengan risiko tinggi terhadap petir, sehingga penting untuk mengevaluasi sistem proteksi petir pada bangunan perkotaan. Salah satu bangunan yang banyak di Jakarta merupakan bangunan pusat perbelanjaan. Penelitian ini menganalisis risiko pada salah satu bangunan pusat perbelanjaan di Jakarta, Gedung XYZ, yang dilakukan berdasarkan standar nasional dan internasional. Sistem proteksi petir eksternal yang terpasang adalah Early Streamer Emission (ESE). Evaluasi dilakukan berdasarkan standar NF C 17-102 dengan fokus pada terminal udara, konduktor penyalur, dan sistem pentanahan. Empat skenario perbaikan area proteksi terminal udara ditawarkan: penggeseran, penambahan, penggantian batang penangkal, dan aplikasi sistem konvensional. Perbaikan sistem *grounding* melibatkan pemasangan *ground ring electrode* atau penambahan elektroda pentanahan di setiap sistem terminasi tanah.

Kata kunci: *Sistem Proteksi Petir, Hari Guruh, Pusat Perbelanjaan*

Abstract— The Sustainable Development Goals (SDGs) are 17 global goals developed by the United Nations to address global challenges such as poverty, environmental degradation, peace and climate change. One of the goals is point 11, "*sustainable cities and communities*," which aims to make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable. Indonesia, with its tropical climate, is prone to lightning showers that can cause electronic damage, injury, death, and fire. With an Isokeraunic Level (IKL) of 45%, Jakarta is one of the cities with a high risk of lightning, making it important to evaluate lightning protection systems in urban buildings. One of the many buildings in Jakarta is a shopping centre building. This research analyses the risk in one of the shopping centre malls in Jakarta, building XYZ, which is conducted based on national and international standards. The installed external lightning protection system is Early Streamer Emission (ESE). The evaluation was conducted based on the NF C 17-102 standard with a focus on the air terminal, the conductor, and the grounding system. Four air terminal protection area improvement scenarios were offered: shifting, adding, replacing the rod, and applying a conventional system. Grounding system improvements involve the installation of ground ring electrodes or the addition of grounding electrodes in each ground termination system.

Keywords: *Lightning Protection System, Thunderstorm Days, Shopping Mall*

I. PENDAHULUAN

Indonesia, sebagai negara yang terletak di persimpangan Benua Asia, Australia, Samudera Pasifik, dan Hindia, juga dilintasi garis khatulistiwa mempunyai variasi iklim yang signifikan. Selain itu, Indonesia merupakan negara kepulauan dengan 70% dari wilayahnya dikelilingi oleh laut [1]. Letak geografis Indonesia tersebut menyebabkan pembentukan awan petir yang kemungkinannya tinggi. Frekuensi petir diukur dengan jumlah hari petir per tahun dan Isokeraunik Level (IKL). Peta Isokeraunik Level menggambarkan tingkat kerawanan petir di suatu daerah

yang dibuat setiap sepuluh tahun sekali berdasarkan pengamatan synoptik hari guruh di daerah tersebut.

Dampak merugikan dari petir diantaranya kebakaran yang dapat merusak bangunan dan hutan, serta membahayakan nyawa manusia dan secara tidak langsung dapat merusak peralatan elektronik dalam bangunan atau struktur. [2] Oleh karena itu, sistem proteksi petir diperlukan sebagai tindakan preventif untuk meminimalisir dampak bahaya, yang mana hal ini berhubungan dengan salah satu Sustainable Development Goals. Poin 11 dari SDG adalah "*sustainable cities and commitments*" yang memiliki tujuan untuk

membuat kota dan pemukiman manusia inklusif, aman, tangguh, dan berkelanjutan.

Data BMKG tahun 2011-2020 menunjukkan bahwa Jakarta memiliki rata-rata 165 hari guruh per tahun dengan IKL 45%, menandakan tingkat kerentanannya terhadap petir yang tinggi [3]. Oleh karena itu, instalasi sistem proteksi petir menjadi krusial, terutama pada bangunan tinggi di Jakarta. Salah satu bangunan yang banyak jumlahnya di Jakarta adalah bangunan pusat perbelanjaan yaitu sejumlah 96 bangunan berdasarkan data Asosiasi Pengusaha Pusat Perbelanjaan Indonesia (APPBI). Pada penelitian ini dilakukan evaluasi terhadap sistem proteksi petir eksternal di Gedung XYZ bertujuan untuk menentukan tingkat keefektifan dan menawarkan opsi perbaikan untuk mewujudkan sistem yang lebih baik. Sebagai langkah konkrit menuju keamanan manusia dan pembangunan berkelanjutan, pemahaman dan implementasi sistem proteksi petir yang efektif menjadi sangat penting pada lokasi ini.

II. STUDI PUSTAKA

Berdasarkan standar IEEE 998-2012, beberapa jenis sambaran petir meliputi sambaran di dalam awan, sambaran antara awan yang terpisah, sambaran ke struktur bangunan tinggi, dan sambaran ke tanah [4]. Pada konteks penelitian sistem proteksi petir eksternal ini, bahaya petir yang dimaksud adalah jenis sambaran ke struktur bangunan dan sambaran ke tanah.

A. SPP Konvensional dan Non-Konvensional

Sistem proteksi petir konvensional adalah batang Franklin, yang dikembangkan oleh Benjamin Franklin pada tahun 1753. Tujuannya adalah untuk menangkap petir dan menyalurkannya ke tanah menggunakan konduktor dan *grounding*. Pengembangan batang Franklin telah mencapai bentuk akhirnya, yang saat ini dikenal sebagai penangkal petir konvensional. [5]

Sistem proteksi petir non-konvensional menggunakan metode seperti pelepasan awan buatan, misalnya, Early Streamer Emission (ESE) dan Charge Transfer System (CTS). Metode-metode ini telah diklaim dapat meningkatkan kinerja penangkal petir Franklin dan memperluas area perlindungan.

B. SPP Eksternal dan Internal

Sistem proteksi petir eksternal melibatkan pemasangan peralatan proteksi di luar gedung, yang berfungsi menerima sambaran petir secara langsung. Sistem ini terdiri dari :

- Terminal udara : dapat berupa penangkal petir atau berdasarkan konsep sangkar Faraday. [6]
- Konduktor penyalur : kabel konduktif atau kabel yang menghubungkan terminal udara ke sistem pentanahan.
- Sistem pentanahan: melibatkan pemasangan satu atau lebih batang elektroda ke dalam tanah untuk menghantarkan, menanam, dan membuang arus listrik ke dalam bumi. [7]

Sistem proteksi petir internal melibatkan pemasangan peralatan proteksi di dalam struktur, yang bertujuan untuk melindungi struktur dan isinya dari efek sambaran petir, seperti tegangan lebih. Komponen sistem proteksi petir internal meliputi:

- *Bonding* : Menghubungkan semua bagian logam di dalam gedung untuk memastikan mereka berada pada potensi listrik yang sama.
- *Shielding* : Menggunakan bahan konduktif untuk melindungi peralatan elektronik dari gangguan elektromagnetik.
- *Arrester* : Perangkat yang melindungi peralatan listrik dengan mengalihkan tegangan berlebih dari komponen sensitif. [7]

C. IEC 62305

International Electrotechnical Commission (IEC) adalah organisasi global untuk standarisasi yang terdiri dari semua komite elektroteknis nasional.[8] IEC 62305 merupakan standarisasi terdiri dari empat bagian yang membahas tentang perlindungan terhadap petir, mulai dari perancangan, pemasangan, dan pemeliharaan.

Standar IEC 62305 ini sangat cocok untuk mendukung penelitian ini. Maka dari itu standar ini digunakan untuk melakukan analisis resiko, mengevaluasi sistem proteksi petir yang telah terinstal pada objek penelitian.

Untuk menganalisis resiko, yang pertama dipertimbangkan adalah N_G adalah jumlah kilatan petir per km^2 per tahun yang mana nilai ini bisa dilihat pada network lokasi petir tanah di banyak wilayah di dunia. Apabila peta N_G tidak tersedia, di daerah beriklim dapat diperkirakan dengan :

$$N_G \approx 0,1T_D \quad (1)$$

dimana T_D adalah hari badai petir per tahun yang bisa didapat dari peta isokeraunik.

Untuk struktur terisolasi di tanah datar, area koleksi (A_D) merupakan area yang ditentukan oleh persimpangan antara permukaan tanah dan garis lurus dengan $1/3$ kemiringan dari bagian atas bangunan dan berputar di sekitarnya. Maka nilai A_D untuk asumsi gedung berbentuk persegi panjang dapat dihitung dengan rumus :

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 \quad (2)$$

dimana L , W , dan H dalam meter.

Jumlah kejadian berbahaya pada bangunan (N_D) dapat dihitung dengan rumus :

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} \quad (3)$$

Dimana :

N_G adalah kerapatan kilat tanah ($1/km^2$ x tahun);

A_D adalah luas area koleksi (m^2) (gambar 2);

C_D adalah faktor lokasi struktur

D. SNI 03-7015-2004

Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-7015-2004 ini merupakan standar yang berlaku di Indonesia tentang sistem proteksi petir pada bangunan gedung, disusun dalam rangka meningkatkan pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung. [9], [10] Pada standar ini, dibahas tentang pemilihan tingkat proteksi yang sesuai untuk sistem proteksi petir yang didasari oleh frekuensi sambaran petir langsung setempat N_D yang diperkirakan ke bangunan gedung terkait dan frekuensi sambaran petir tahunan setempat yang dibolehkan N_C . N_G berupa densitas sambaran petir ke tanah dinyatakan dalam jumlah per km^2 per tahun atau dapat diperkirakan seperti (4).

$$N_G = 0,04T_D^{1,25} \text{ per km}^2 \text{ per tahun} \quad (4)$$

Selanjutnya nilai N_D dan N_C dapat dibandingkan untuk menentukan keperluan gedung akan sistem proteksi petir, yaitu :

- Apabila $N_D \leq N_C$ berarti sistem proteksi petir tidak diperlukan
- Apabila $N_D > N_C$ berarti sistem proteksi petir diperlukan dengan efisiensi E dan tingkat proteksi yang sesuai dapat ditentukan sesuai (5) dan tabel 1.

$$E = 1 - \frac{N_C}{N_D} \quad (5)$$

Tabel 1. Tingkat Proteksi Sistem berdasarkan Efisiensi

Level Proteksi	Efisiensi (E)
I	0,98
II	0,95
III	0,9
IV	0

E. NFPA 780

Standar ini dibuat oleh National Fire Protection Association dan membahas instalasi sistem proteksi petir. Standar ini mencakup perhitungan analisis risiko, yang memerlukan nilai-nilai seperti kerapatan sambaran petir (N_G), ancaman tahunan sambaran petir (N_D), dan frekuensi kejadian petir yang dapat ditoleransi (N_C). [11]
 Frekuensi kejadian petir yang dapat ditoleransi (N_C) dinyatakan dalam rumus (6).

$$N_C = \frac{1,5 \times 10^{-3}}{(C_2)(C_3)(C_4)(C_5)} \text{ kejadian per tahun} \quad (6)$$

C_2 = Koefisien Konstruksi

C_3 = Koefisien Isi Struktur

C_4 = Koefisien Okupansi Struktur

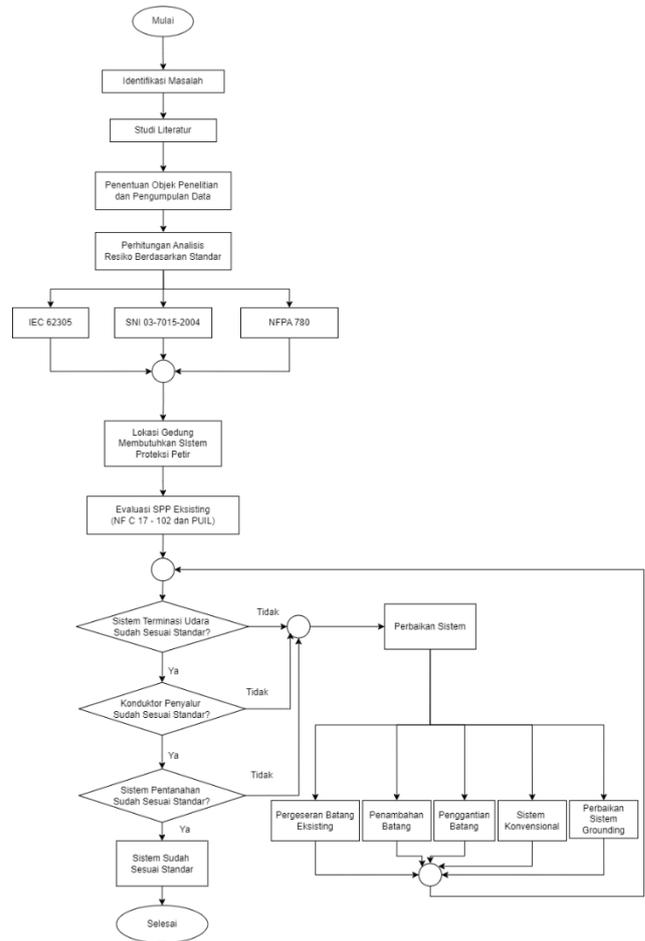
C_5 = Koefisien Konsekuensi Petir

III. METODE

A. Diagram Alir

Penelitian ini dimulai dengan identifikasi masalah dan studi literatur. Dilanjutkan dengan pengumpulan data yang memungkinkan dilakukannya analisis risiko untuk menentukan kebutuhan sistem proteksi petir dengan menggunakan standar IEC 62305, SNI 03-7015-2004, dan NFPA 780. Analisis tersebut mengkonfirmasi kebutuhan akan sistem proteksi, yang mengarah pada evaluasi pengaturan yang ada berdasarkan NF C 17-102 dan PUIL 2020.

Proses evaluasi dimulai dengan sistem terminasi udara, diikuti dengan sistem konduktor bawah dan pentanahan. Komponen yang belum sesuai dengan standar maka diperbaiki. Perbaikan sistem yang ditawarkan berupa empat skenario: desain sistem konvensional, menggeser batang yang ada, menambahkan batang, dan mengubah jenis batang, bersama dengan konfigurasi sistem pentanahan. Setelah menerapkan perbaikan, keefektifan sistem diperiksa ulang, dimulai dengan terminasi udara, diikuti oleh konduktor bawah dan sistem pentanahan, untuk memastikan seluruh sistem proteksi petir efektif, sehingga menyelesaikan penelitian.

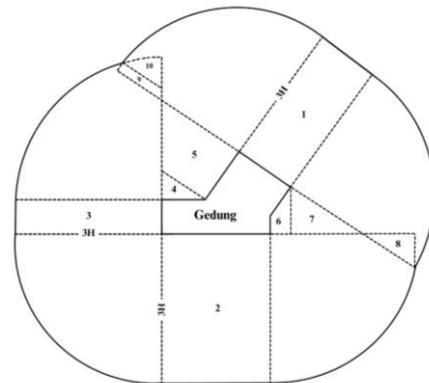


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Perhitungan Analisis Resiko

Berdasarkan data BMKG tahun 2011-2020, Jakarta memiliki rata-rata 165 hari guruh per tahun dengan IKL sebesar 45%, oleh karena itu perhitungan kerapatan petir ke tanah (N_G) berdasarkan persamaan (1) adalah sebagai berikut:

$$N_G = 0,1 \times 165 = 16,5 \text{ kilatan per km}^2 \text{ per tahun}$$



Gambar 2. Ilustrasi A_D untuk Gedung XYZ

Kemudian, untuk area A_D seperti yang ditunjukkan pada gambar 2, perhitungannya meliputi luas bangunan ditambah dengan jari-jari di sekitar bangunan dengan panjang tiga kali tinggi bangunan. Karena bangunan Gedung XYZ tidak berbentuk persegi panjang, maka perhitungan tidak dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2). Melainkan,

luas area dihitung secara manual, menghasilkan $A_D = 106.029,26 \text{ m}^2$.

Selanjutnya, perhitungan N_D dapat dilakukan sesuai dengan persamaan (3), dengan C_D bernilai 0,25 karena terdapat gedung yang lebih tinggi yang berdekatan dengan Gedung XYZ :

$$N_D = 16,5 \times 106029,26 \times 0,25 \times 10^{-6} = 0,437 \text{ per km}^2 \text{ per tahun}$$

Perhitungan frekuensi kejadian petir yang dapat ditoleransi (N_C) dilakukan menurut persamaan (6) sebagai berikut:

$$N_C = \frac{1,5 \times 10^{-3}}{(1)(2)(3)(1)} = 0,00025 \text{ kejadian per tahun}$$

Rekapitulasi perhitungan analisis resiko untuk tiap standar tertera pada tabel 2. Dari hasil perhitungan semua standar didapat nilai N_D lebih besar dari pada N_C yang berarti sistem proteksi petir diperlukan, kemudian efisiensi E dihitung berdasarkan persamaan (5) dan tingkat proteksi yang sesuai dapat ditentukan berdasarkan tabel 1.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Analisis Resiko

Standar	N_D	N_C	Keterangan	E	Level Proteksi
IEC 62305	1	0,00025	$N_D > N_C$	0,9994	I
SNI 03-7015-2004	1	0,00025	$N_D > N_C$	0,9999	I
NFPA 780	1	0,00025	$N_D > N_C$	0,9994	I

C. Objek Penelitian

Objek penelitian berupa gedung pusat perbelanjaan yang berlokasi di Jakarta. Data petir di lokasi ini dapat dilihat pada peta isokeraunik level berupa data IKL terbaru hingga tahun 2020. Berdasarkan peta, didapat IKL untuk daerah Jakarta adalah 45%. [3] Karena IKL ini merupakan persentase perbandingan hari guruh per banyaknya hari dalam setahun, maka didapat data hari guruh per tahun di Jakarta adalah 165 hari.

Jenis batang penangkal yang terinstal adalah tipe non-konvensional yaitu *Early Streamer Emission* (ESE) dengan merek Stormaster ESE Air Terminal yang merupakan produk dari LPI Pty. Ltd.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini akan menyajikan evaluasi sistem proteksi petir eksternal yang terinstal di Gedung XYZ, yang merupakan sistem non-konvensional. Selain itu, rekomendasi akan ditawarkan dalam bentuk empat skenario perbaikan.

A. Sistem Proteksi Petir berdasarkan Standar

Evaluasi sistem proteksi petir eksternal pada Gedung XYZ bertujuan untuk menentukan efektivitasnya berdasarkan standar NF C 17-102. Efektivitas dinilai dari komponennya: terminal udara, konduktor penyalur, dan sistem pentanahan. Terminal udara yang efektif harus bisa memproteksi seluruh area yang perlu dilindungi dengan radius yang dihitung menggunakan persamaan (7), memastikan terminal udara setidaknya 2 meter di atas area yang dilindungi. Konduktor bawah yang efektif untuk sistem ESE tidak terisolasi setiap terminal udara ESE harus terhubung ke setidaknya dua konduktor penyalur. Sistem

ESE yang terisolasi memerlukan setidaknya satu konduktor penyalur per terminal udara. Konduktor penyalur harus lurus, mengikuti jalur terpendek untuk menghindari tikungan tajam, dengan luas penampang minimum 50 mm^2 untuk tembaga. Berdasarkan NF C 17-102, sistem pentanahan memerlukan resistansi yang diukur di bawah 10Ω , namun berdasarkan PUIL 2020, sistem pentanahan memerlukan resistansi yang diukur di bawah 5Ω . Menghindari komponen pentanahan horizontal atau vertikal yang terlalu panjang ($>20 \text{ m}$), dan memastikan setiap konduktor penyalur memiliki setidaknya dua elektroda per titik pentanahan, dengan jarak antar batang elektroda setidaknya 1,8 meter dan setiap elektroda memiliki panjang setidaknya 3 meter.

B. Evaluasi Terminal Udara dan Area Perlindungan

Berdasarkan persamaan (5), bangunan memiliki tingkat perlindungan I. *Early Streamer Emission Air Terminal* (ESEAT) memiliki radius perlindungan yang bergantung pada ketinggian (h) relatif terhadap permukaan yang akan dilindungi, efisiensinya, dan tingkat perlindungan yang dipilih :

$$R_p(h) = \sqrt{2rh - h^2 + \Delta(2r + \Delta)} \text{ untuk } h \geq 5 \text{ m} \quad (7)$$

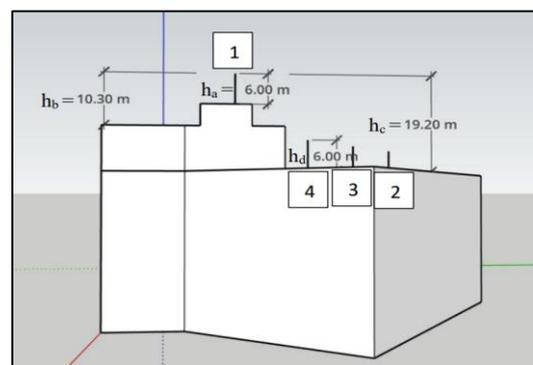
dimana :

- $R_p(h)$ (m) = radius proteksi pada ketinggian tertentu h.
- h(m) = ketinggian ujung ESEAT di atas bidang horizontal ke titik terjauh objek yang akan dilindungi.
- r (m) = konstanta jarak sesuai tingkat perlindungan.
- Δ (m) adalah efisiensi sesuai tipe ESE yang digunakan. [12], [13]

Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan radius proteksi dengan penomoran batang sesuai dengan gambar 3. Dari gambar 3 dapat dilihat bahwa ketinggian batang terminal udara telah memenuhi standar yaitu minimal 2 meter di atas area yang dilindunginya.

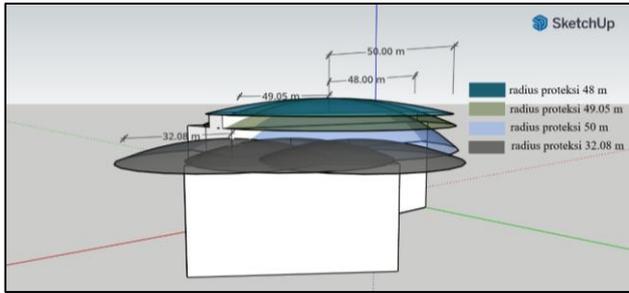
Tabel 3. Hasil Perhitungan Radius Proteksi

Nomor Batang	Tipe	h (m)	$R_p(h)$ (m)
1	ESE 30	$h_a = 6$	48
1	ESE 30	$h_b = 10,3$	49,05
1	ESE 30	$h_c = 19,2$	50
2, 3, 4	ESE 15	$h_d = 6$	32,08

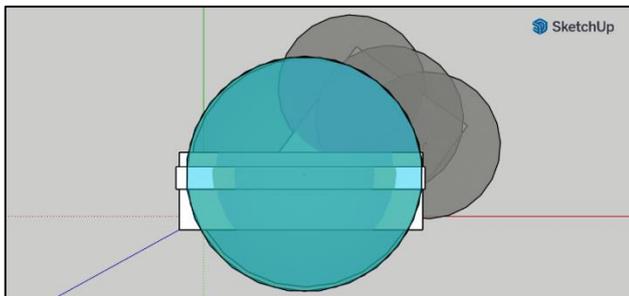


Gambar 3. Penomoran dan Ketinggian Batang ESEAT

Gambar 4 dan 5 yang merupakan ilustrasi sistem proteksi petir eksisting di Gedung XYZ. Terlihat bagian samping bangunan yang masih belum terlindungi, sehingga masih diperlukan proteksi yang menyeluruh. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa sistem terminasi udara belum efektif.



Gambar 4. Ilustrasi Radius Proteksi SPP Eksisting Tampak Samping



Gambar 5. Ilustrasi Radius Proteksi SPP Eksisting Tampak Atas

C. Evaluasi Konduktor Penyalur

Kriteria pertama berdasarkan NF C 12-107 adalah untuk sistem ESE tidak terisolasi. Setiap ESEAT harus terhubung dengan setidaknya dua konduktor penyalur. Karena sistem eksisting pada Gedung XYZ adalah sistem ESE tidak terisolasi, maka kriteria ini harus terpenuhi. Kriteria ini terpenuhi karena setiap ESEAT (terminasi udara) terhubung dengan dua konduktor penyalur.

Kriteria kedua adalah ketika beberapa ESEAT berada di bangunan yang sama, dengan jumlah n ESEAT di atap, tidak selalu diperlukan 2n konduktor penyalur yang terpasang, melainkan setidaknya n konduktor penyalur. Pada Gedung XYZ, n sesuai konteks adalah senilai 4, dengan dua konduktor untuk tiap terminasi, berarti kriteria kedua sudah terpenuhi.

Yang ketiga berlaku untuk sistem ESE terisolasi yaitu setidaknya satu konduktor penyalur dibutuhkan untuk tiap ESEAT yang mana meskipun kriteria ini terpenuhi, tetapi tidak relevan karena sistem eksisting adalah tidak terisolasi. Kriteria terakhir adalah penyusunan konduktor penyalur yang perlu menghindari bengkokan tajam, yang mana ini sudah terpenuhi karena kabel konduktor telah diinstal melalui tembok luar struktur tanpa melalui bengkokan tajam, karena struktur luar dari gedung tidak ada yang berupa lekukan tajam.

Tabel 4. Evaluasi Konduktor Penyalur

Ketentuan	Kesesuaian
Untuk sistem ESE tidak terisolasi, setiap ESEAT harus terhubung dengan setidaknya dua down-conductor.	Sesuai
Ketika beberapa ESEAT berada di bangunan yang sama, dengan jumlah n ESEAT di atap, tidak selalu diperlukan 2n konduktor penyalur yang terpasang, melainkan setidaknya n konduktor penyalur.	Sesuai
Konduktor penyalur harus dipasang sedemikian rupa sehingga jalurnya selangsung mungkin.	Sesuai
Penyusunan konduktor penyalur harus selurus mungkin, mengikuti jalur terpendek, menghindari bengkokan tajam.	Sesuai

Standar IEC 62305 mengatur tentang luas penampang minimal untuk konduktor penyalur, yaitu 50 mm² untuk tembaga. [8], [14] Pada sistem proteksi petir eksternal di

Gedung XYZ, konduktor penyalur berupa kabel koaksial tembaga dengan luas penampang adalah 2x35 mm², berarti kriteria ini telah terpenuhi juga dengan asumsi kedua kabel senilai dengan 70 mm². Dari beberapa kriteria yang telah dibahas, dapat disimpulkan seperti tabel 4 sehingga konduktor penyalur yang telah terinstal sudah sesuai dengan kriteria dan bisa juga disebut sudah efektif.

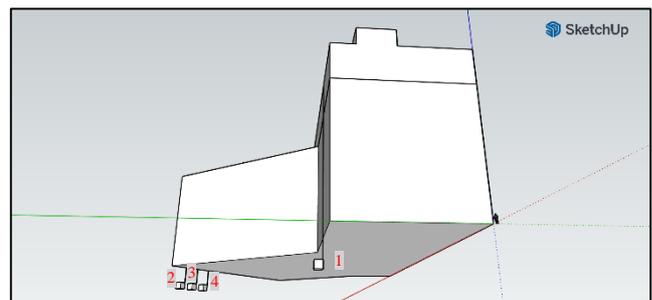
D. Evaluasi Sistem Pentanahan

Berdasarkan NF C 12-107, kriteria mengenai sistem grounding salah satunya adalah tentang nilai resistansi tanah. Nilai resistansi ini yang diukur menggunakan peralatan konvensional atau *earth tester* harus sekecil mungkin yaitu dibawah 10 Ω. [12] Berdasarkan hasil pengukuran, didapatkan nilai pada tiap titik grounding seperti pada tabel 5 dengan penomoran mengacu pada gambar 6.

Dari hasil pengukuran, menurut NF C 12-107, kriteria ini sudah terpenuhi. Namun, ada juga peraturan mengenai nilai resistansi pentanahan berdasarkan Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2020), bahwa untuk menghindari bahaya sambaran petir, sebuah bangunan membutuhkan nilai tahanan pentanahan di bawah 5 Ω. Oleh karena itu, meskipun tahanan pentanahan telah memenuhi standar NF C 17-102, namun menurut PUIL, kondisi saat ini di Gedung XYZ belum efektif, yang mengindikasikan bahwa perlu dilakukan perbaikan.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Resistansi Pentanahan

Jarak Auxiliary Earthing Electrode S dan H	Resistansi (Ω)			
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4
S : 5 m & H: 10 m	3.68	9.12	7.45	8.45
S : 10 m & H: 20 m	3.69	9.15	7.48	8.37
Rata-Rata	3.685	9.135	7.465	8.41



Gambar 6. Penomoran Titik Sistem Pentanahan

Adapula perhitungan resistansi tanah untuk *one ground rod* seperti berikut :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \tag{8}$$

dengan :

- Resistivitas pentanahan (ρ) = 20 - 100 Ωm untuk tanah liat (PUIL 2020)
- Jari-jari batang (a) = 0,01 m
- Panjang batang (L) = 5 m

$$R_{(\rho = 20 \Omega m)} = \frac{20}{2\pi 5} \left(\ln \frac{4(5)}{0,01} - 1 \right) = 4,2 \Omega$$

$$R_{(\rho = 100 \Omega m)} = \frac{100}{2\pi 5} \left(\ln \frac{4(5)}{0,01} - 1 \right) = 21 \Omega$$

Berdasarkan perhitungan, nilai resistansi untuk tanah liat dapat berkisar dari 4,2 hingga 21 Ω . Dengan demikian, hal ini sesuai dengan hasil pengukuran.

Meskipun begitu, dari kriteria yang dirangkum dalam tabel 6, hal ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan yang ada di Gedung XYZ belum efektif, sehingga membutuhkan perbaikan.

Tabel 6. Rekapitulasi Evaluasi Sistem Pentanahan

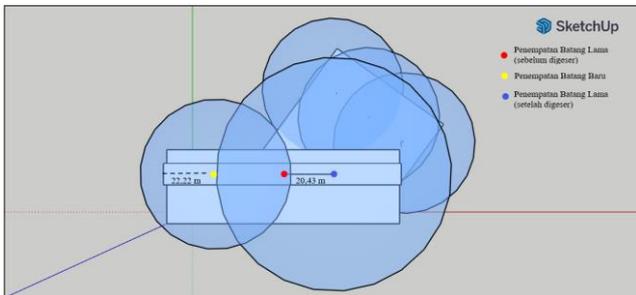
Ketentuan	Kesesuaian
Nilai resistansi yang diukur menggunakan peralatan konvensional harus sekecil mungkin (kurang dari 10 Ω)	Sesuai
Sistem terminasi tanah yang memiliki satu komponen horizontal atau vertikal yang terlalu panjang (> 20 m) sebaiknya dihindari untuk meminimalkan penurunan tegangan induktif.	Sesuai
Satu terminasi tanah dibutuhkan untuk setiap konduktor penyalur dengan setidaknya dua elektroda per terminasi tanah.	Tidak Sesuai
Jarak antara batang elektroda pentanahan setidaknya 6 kaki atau 1,8 meter.	Sesuai

E. Perbaikan SPP pada Gedung XYZ

Dari evaluasi ketiga komponen tersebut, ditemukan bahwa sistem terminasi udara belum efektif dalam menghasilkan area proteksi. Oleh karena itu, sistem perlu diperbaiki dengan beberapa skenario, antara lain menggeser penangkal petir ke titik yang berbeda, menambah penangkal petir, mengganti jenis penangkal petir, dan menggunakan sistem konvensional, serta memperbaiki sistem pentanahan.

1) Skenario 1 : Pergeseran Batang Eksisting

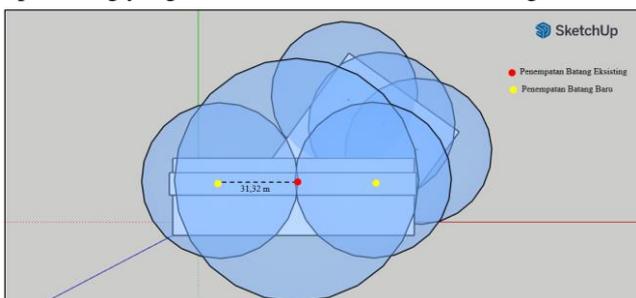
Skenario ini melibatkan pergeseran batang 1 (ESE 30) ke kanan sejauh 20,43 meter dan memasang batang baru (ESE 15) pada jarak 22,22 meter dari sisi kiri bangunan.



Gambar 7. Ilustrasi Perbaikan Skenario 1

2) Skenario 2 : Penambahan Batang

Skenario ini dilakukan dengan menambah dua batang penangkal baru yaitu di sebelah kanan dan kiri batang penangkal 1 dengan jarak 31,32 meter dari batang 1, dengan tipe batang yang ditambah adalah dua buah batang ESE 15.



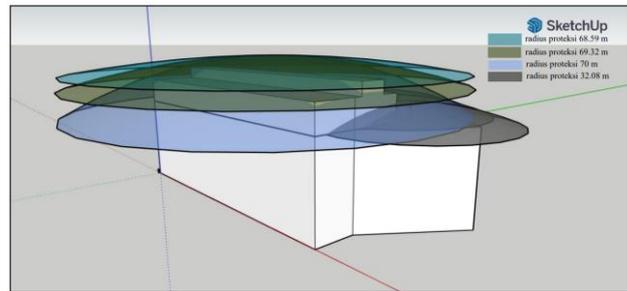
Gambar 8. Ilustrasi Perbaikan Skenario 2

3) Skenario 3 : Penggantian Batang

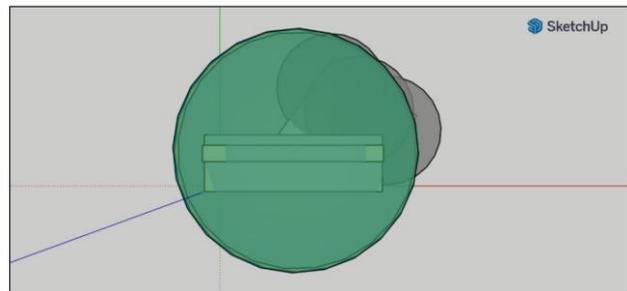
Pada skenario ketiga, batang eksisting diganti dengan batang yang tipenya lebih tinggi. Seperti yang diketahui bahwa batang 1 eksisting memiliki tipe Stormaster ESE 30 yang belum memproteksi keseluruhan gedung, batang ini diganti menjadi tipe Stormaster ESE 50. Dengan ini, dilakukan perhitungan layaknya persamaan (7) yang menghasilkan radius proteksi seperti tabel 7 dan ilustrasi seperti gambar 9 dan 10.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Radius Proteksi Skenario 3

No	Batang Terminasi Udara	h (m)	Rp(h) (m)
1	1	$h_1 = 6$	68.59
2	1	$h_2 = 10,29$	69.32
3	1	$h_3 = 19,2$	70



Gambar 9. Ilustrasi Perbaikan Skenario 3 Tampak Samping

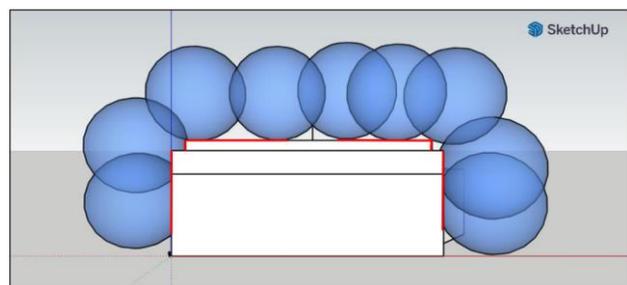


Gambar 10. Ilustrasi Perbaikan Skenario 3 Tampak Atas

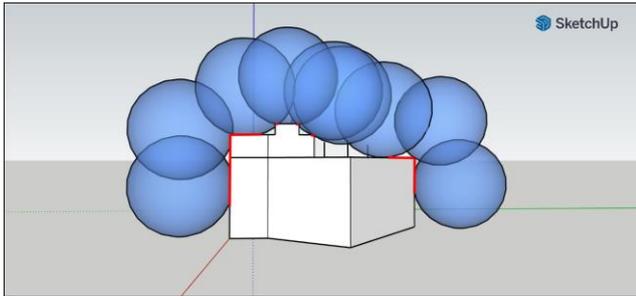
4) Skenario 4 : Sistem Konvensional

Metode bola bergulir digunakan untuk menentukan bagian mana dari bangunan yang membutuhkan penangkal petir. Dalam metode ini, sebuah bola digulirkan di seluruh area luar bangunan. Setiap bagian bangunan yang tersentuh oleh bola memerlukan pemasangan penangkal petir, dengan syarat bola hanya menyentuh tanah dan/atau penangkal petir itu sendiri. Radius bola yang digunakan adalah 20 m untuk proteksi tingkat I.

Pada gambar 11 dan 12, area yang tersentuh oleh bola ditandai dengan garis merah, di mana penangkal petir harus dipasang. Ada juga perhitungan untuk jarak antara batang terminal udara sesuai persamaan (9).



Gambar 11. Ilustrasi Metode Bola Bergulir Tampak Depan



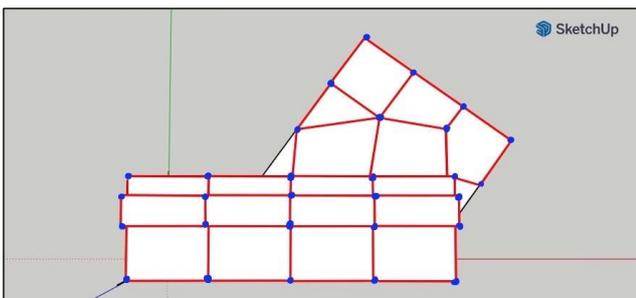
Gambar 12. Ilustrasi Metode Bola Bergulir Tampak Samping

$$d = 2\sqrt{2rh - h^2} \quad (9)$$

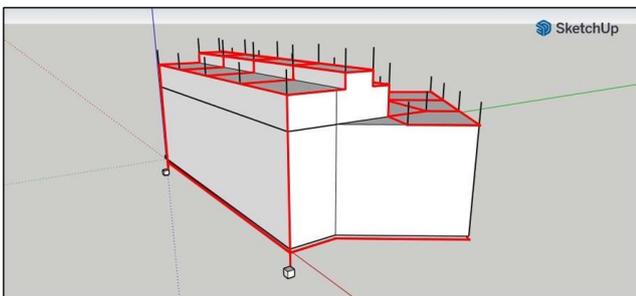
$$d = 2\sqrt{2(20)(6) - 6^2} = 28.6 \text{ m}$$

Gambar 13 dan 14 adalah ilustrasi desain perancangan. Pada gambar 13, dapat dilihat bahwa perancangan dilakukan dengan memasang 29 buah penangkal petir yang diwakili oleh titik-titik berwarna biru dengan masing-masing batang dihubungkan satu sama lain menggunakan kabel konduktor yang ditandai dengan garis berwarna merah yang dihubungkan ke grounding seperti pada gambar 14. Berdasarkan perhitungan di atas, jarak 28,6 meter digunakan sebagai jarak maksimum antar masing-masing penangkal.

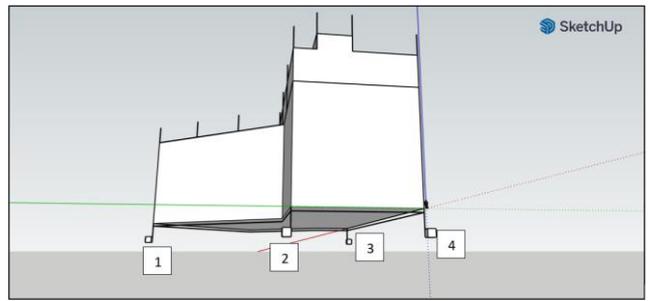
Untuk sistem pentanahan, empat buah elektroda pentanahan dipasang dengan menggunakan konfigurasi berdasarkan NFPA 780, yaitu elektroda *ground ring* dimana keempat titik tersebut disambungkan lagi di dalam tanah dengan kedalaman 1 meter seperti yang terlihat pada gambar 15.



Gambar 13. Ilustrasi Perbaikan Skenario 4 Tampak Atas



Gambar 14. Ilustrasi Perbaikan Skenario 4 Tampak Samping

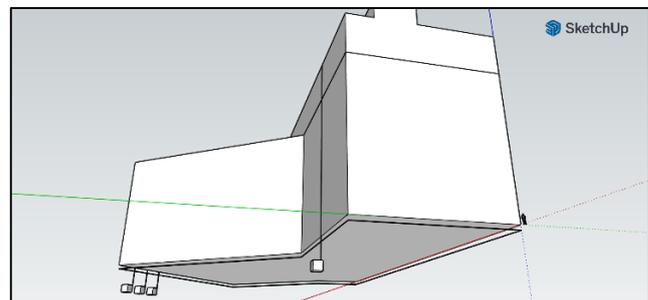


Gambar 15. Sistem Grounding pada Skenario 4

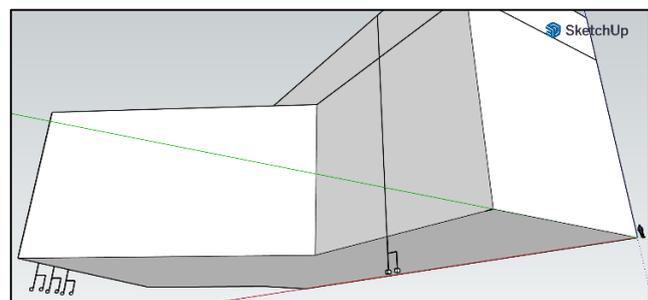
5) Perbaikan Sistem Pentanahan

Perbaikan sistem pentanahan ini merupakan bagian dari skenario 1, 2, dan 3. Perbaikan ini dapat dilakukan dengan dua konfigurasi, yaitu penggunaan konfigurasi *ground ring electrode* dan konfigurasi untuk tiap sistem terminasi tanah yang independen. Gambar 6 berupa sistem terminasi tanah eksisting pada Gedung XYZ dengan setiap terminasi tanah hanya memiliki satu batang elektroda. Kemudian untuk perbaikan konfigurasi *ground ring electrode* berarti setiap batang elektroda disambung satu sama lain mengelilingi gedung yang ditanam dalam tanah pada kedalaman tidak kurang dari 45 cm [11], pada ilustrasi ditanam pada kedalaman 1 meter dapat dilihat pada gambar 16.

Perbaikan dapat juga dilakukan berdasarkan kriteria berdasarkan NF C 17 – 102 yaitu satu terminasi tanah akan dibutuhkan untuk setiap konduktor penyalur dengan setidaknya dua elektroda per terminasi tanah seperti pada gambar 17. Melihat tabel 5, terdapat tiga titik yang masih di atas nilai 5 Ω. Maka dari itu, pada Gedung XYZ dapat dilakukan perbaikan berupa ditambahkan masing-masing satu batang elektroda ke terminasi tanah titik 2, 3, dan 4. Dengan masing-masing sistem terminasi tanah memiliki dua batang elektroda, maka nilai resistansi pentanahan diharapkan akan menjadi setengah kali nilai resistansi satu batang elektroda.



Gambar 16. Ilustrasi Konfigurasi *Ground Ring Electrode*



Gambar 17. Perbaikan Sistem Pentanahan Penambahan Batang Elektroda

6) *Perbandingan Skenario*

Tabel 8 menunjukkan bahwa keempat skenario berhasil menghasilkan radius perlindungan yang cukup untuk bangunan. Oleh karena itu, skenario dibandingkan berdasarkan kekurangannya.

Skenario 1 membutuhkan dua upaya : menggeser batang 1 dan memasang batang tambahan, yang lebih ekonomis karena hanya memerlukan satu batang tambahan. Skenario 2 membutuhkan dua batang baru, meningkatkan biaya lebih dari skenario 1, dan menghasilkan radius perlindungan yang terlalu luas. Skenario 4 memerlukan 29 batang konvensional, kurang estetis, dan hanya menangkap petir yang menyambar batang.

Skenario 3 hanya memiliki satu kekurangan: batang yang ada harus diganti dengan ESE 50, menjadikannya solusi terbaik. Namun, pertimbangan perlu diberikan pada pemasangan konduktor. Sebagai contoh, pada skenario 3, jika mengganti batang dengan tipe yang lebih tinggi membutuhkan penggantian konduktor juga, maka ini membuat skenario 3 tidak lagi menjadi solusi terbaik, melainkan skenario 1.

Skenario 1 akan menggeser batang 1 yang akan membutuhkan pergeseran konduktor dan menambahkan batang baru yang akan membutuhkan konduktor dan pentanahan baru juga. Namun, mengacu pada brosur produk rod, jika batang diganti dengan tipe yang berbeda, konduktor yang sama masih dapat digunakan. [13]Hal ini berarti bahwa skenario 3 tetap menjadi solusi terbaik untuk mencapai sistem terminasi udara yang efektif.

Tabel 8. Perbandingan Skenario

	Kelebihan	Kekurangan
Skenario 1 Pergeseran Batang	Radius proteksi telah mencakupi	Diperlukan dua 63 paya, batang 1 digeser dan ditambah pemasangan 1 batang di sebelumnya
Skenario 2 Penambahan Batang	Radius proteksi telah mencakupi Tidak mengubah sistem yang sudah ada	Diperlukan dua batang baru yang akan menambah biaya untuk pembelian lebih dari skenario 1. Radius proteksi jauh lebih luas daripada yang diperlukan sehingga menjadi sia-sia
Skenario 3 Penggantian Batang	Radius proteksi telah mencakupi Lebih ekonomis	Hanya diperlukan biaya pembelian untuk 1 batang yang lebih tinggi tipenya Diperlukan 29 batang untuk mencapai proteksi yang dibutuhkan
Skenario 4 Sistem Konvensional	Radius proteksi telah mencakupi	Nilai estetika yang kurang karena terlalu banyak terminasi udara Hanya menangkap petir yang menyambar batang penangkal

V. KESIMPULAN

Evaluasi sistem proteksi petir eksternal dilakukan dengan mengacu pada NF C 17 - 102, yang didasarkan pada tiga

komponen yang membentuk sistem proteksi petir eksternal, yaitu terminasi udara, konduktor, dan sistem pentanahan. Sistem proteksi petir eksternal pada Gedung XYZ tergolong belum efektif karena terminasi udara dan sistem pentanahannya. Terminasi udara dinilai belum efektif karena radius proteksi yang dihasilkan belum mampu melindungi seluruh bagian gedung dan sistem pentanahan dinilai belum efektif karena setiap konduktor hanya terhubung dengan satu elektroda per terminasi pentanahan.

Empat skenario ditawarkan untuk menghasilkan daerah perlindungan yang memadai, yaitu pergeseran batang, penambahan batang, penggantian jenis batang, dan penerapan sistem konvensional. Perbaikan sistem pentanahan dilakukan dengan konfigurasi *ground ring electrode* untuk setiap skenario. Skenario yang paling efektif adalah skenario ketiga, yaitu penggantian batang.

REFERENSI

- [1] I. M. Y. Negara, A. B. Ksatria, D. Fahmi, D. A. Asfani, I. G. N. S. Hernanda, and R. B. Pratama, "Investigation and improvement of standard external lightning protection system: Industrial case study," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14141118.
- [2] S. Gholami Farkoush, A. Wadood, T. Khurshaid, C.-H. Kim, M. Irfan, and S.-B. Rhee, "Reducing the Effect of Lightning on Step and Touch Voltages in a Grounding Grid Using a Nature-Inspired Genetic Algorithm With ATP-EMTP," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 81903–81910, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923656.
- [3] BMKG, "Informasi Petir Bulan Januari 2023." Accessed: Dec. 17, 2023. [Online]. Available: <https://bmkg.go.id/geofisika-potensial/peta-sambaran-petir.bmkg?p=peta-sambaran-petir-bulan-januari-2023&lang=ID>
- [4] S. Committee of the IEEE Power and E. Society, "IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations Sponsored by the Substations Committee IEEE Power and Energy Society," 2013.
- [5] A. Ozdemir and S. Ilhan, "Experimental Performance Analysis of Conventional and Non-Conventional Lightning Protection Systems – Preliminary Results," *Electric Power Systems Research*, vol. 216, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.109080.
- [6] Å. Wisten, "Impact of Lightning on Street Lights : - An experimental study investigating different poles and cables," in *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, 2020, pp. 1–7. doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245737.
- [7] I. Hendratama, B. Denov, and R. Zoro, "Lightning Protection System Standardization on Indonesian Railway Operation Facilities," in *2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011083.
- [8] International Electrotechnical Commission, *IEC 62305 : Protection Against Lightning*. 2010.
- [9] Panitia Teknik 21S Konstruksi Bangunan Sipil, *SNI 03-7015-2004 : Sistem Proteksi Petir pada Bangunan Gedung*. 2004.
- [10] "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems," *IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991)*, pp. 1–225, 2007, doi: 10.1109/IEEESTD.2007.4396963.
- [11] National Fire Protection Association, *NFPA 780 : Standard for the Installation of Lightning Protection Systems*. 2020.
- [12] Union Technique de l'Electricité, *NF C 17-102 : Protection Against Lightning; Early Streamer Emission Lightning Protection Systems*. 2011.
- [13] "STORMASTER ESE Air Terminal." [Online]. Available: www.lpi.com.au
- [14] British Standards, *BS EN 50164 : Lightning Protection Components*. 2008.