

Analisis Perencanaan Sistem Proteksi Petir Eksternal Gedung Bertingkat Menggunakan Metode Rolling Sphere (Studi Kasus: The Arumaya Office Jakarta)

Maulana Afandi M*, Linda Wijayanti

Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya Jakarta

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i> Received Desember 18, 2025 Accepted January 9, 2026 <i>Keywords:</i> Lightning Protection, Rolling Sphere, Indonesian National Standard, High-rise Building	<i>Lightning strike is a significant risk for human safety and infrastructure reliability, specific to the tropical country, Indonesia faces risk on high intensity of lightning strike and specific characteristics that differs to another region. This led to demand for specific standardize lightning protection system planning to minimize risk of structural damage or even electricity failure. A few approaches have been widely applied such as protection angle method, and mesh method. However, studies explained that those methods face a limitation and ineffective for high rise building. Thus, this research is conduct to apply a proper and standardize rolling sphere method by SNI-03-7015-2004 and IEC 62350. The research object is the project of "The Arumaya Office" and it shows that this project has Protection Class III with 90% efficiency and peak current up to 10 kA. This result is used to design the protection zone, air terminal placement and the material utilized.</i>

Info Artikel	Abstrak
<i>Histori Artikel:</i> Diserahkan: 18 Desember 2025 Diterima: 9 Januari 2026 Kata Kunci: Proteksi Petir, Rolling Sphere, Standar Nasional Indonesia, Pangunan Bertingkat	Sambaran petir merupakan ancaman signifikan bagi keselamatan manusia maupun keandalan infrastruktur, khususnya di wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki intensitas sambaran petir tinggi dan karakteristiknya yang berbeda dari wilayah lain. Kondisi ini menuntut perencanaan sistem proteksi petir terstandarisasi untuk meminimalisir risiko kerusakan struktural maupun kegagalan sistem kelistrikan. Beberapa pendekatan telah diaplikasikan secara luas seperti metode sudut proteksi dan metode jala. Namun, studi menunjukkan bahwa kedua metode tersebut tidak efektif diaplikasikan pada bangunan tinggi sehingga penelitian ini menerapkan metode perancangan sistem penangkal petir menggunakan pendekatan rolling sphere yang sudah terstandarisasi SNI-03-7015-2004 dan IEC 62350. Objek penelitian ini adalah proyek perencanaan sistem proteksi petir Gedung "The Arumaya Office". Menggunakan pendekatan rolling-sphere didapatkan hasil bahwa Gedung ini memiliki kelas Proteksi III dengan efisiensi 90% dan arus puncak petir mencapai 10 kA. Angka tersebut digunakan untuk merancang zona proteksi, penempatan air terminal, hingga material sistem proteksi yang digunakan.

1. PENDAHULUAN

Petir merupakan suatu fenomena alam yang timbul akibat terjadinya pelepasan muatan listrik positif maupun negatif secara tiba-tiba dari awan. Berdasarkan tempat pelepasannya, pelepasan muatan listrik tersebut dapat terjadi dalam satu awan (*inter-cloud*), antar awan (*cloud-to-cloud*), dan dari awan ke bumi (*cloud-to-ground*) kemampuan bumi menyerap

*Corresponding author. Maulana Afandi M
Email address: maulana.12025006166@student.atmajaya.ac.id

muatan petir, bumi dikenal sebagai wadah yang memiliki potensial nol. Artinya sebesar apa pun muatan yang dibawa oleh petir mampu untuk di netralkan oleh bumi (Wulandari, Putra, & Rizqi, 2023). Apabila muatan ini saling bertemu, maka akan terjadi reaksi tarik menarik yang dapat menimbulkan kilatan cahaya. Loncatan listrik memiliki kecepatan sangat tinggi hingga dapat mencapai lebih dari 400.000 km/jam, menimbulkan tegangan arus sangat kuat mencapai ratusan kilo ampere, menyebabkan kenaikan suhu mencapai 25000°C pada medium udara yang dilalui, serta menghasilkan suara yang sangat tinggi (Zoro, 2018). Jika pelepasan muatan dari petir berdekatan dengan bumi yang mengandung muatan positif dan negatif, maka fenomena sambaran petir dapat terjadi.

Indonesia terletak di wilayah tropis yang dikelilingi oleh lautan, menjadi negara yang memiliki potensi pembentukan awan petir berfrekuensi tinggi di dunia (Mahira *et al.*, 2024), selain wilayah Afrika Tengah dan lembah Sungai Arizona. Kerawanan petir ini dapat menimbulkan berbagai kerugian, diantaranya ancaman bahaya terhadap keselamatan manusia dan ekosistem, serta dapat merusak infrastruktur (Farkoush *et al.*, 2019). Mengingat semakin masifnya pembangunan infrastuktur skala besar di Indonesia, maka perhatian terhadap keselamatan dari bahaya sambaran petir perlu lebih diperhatikan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah memaksimalkan sistem penangkal petir yang handal serta memenuhi standar yang berlaku.

Sistem proteksi petir, yang familiar disebut sebagai penangkal petir, adalah serangkaian komponen dan metode yang dirancang sebagai sistem yang berfungsi untuk menangkap dan menyalurkan arus listrik yang dihantarkan dari awan bermuatan negatif ke bumi untuk dinetralkan melalui elektroda sehingga infrastuktur, manusia, atau sistem kelistrikan dapat terhindar dari gangguan yang ditimbulkan dari lonjakan arus listrik yang dihantarkan (Du *et al.*, 2016; Johns, 2016; Hosea, 2004). Instalasi sistem proteksi petir eksternal adalah beberapa komponen di luar struktur yang berfungsi untuk menangkap arus petir dan menghantarkannya ke sistem pertanahan. Terminasi udara berfungsi sebagai ujung tombak penangkap muatan arus petir di tempat tertinggi. Perancangan terminasi udara memiliki beberapa metode dan teori untuk menentukan penempatan terminasi udara dan mengetahui daerah proteksi (Mulyadi, 2023).

Gedung tinggi atau bertingkat rentan terhadap sambaran petir karena merupakan bangunan tertinggi, sehingga kemungkinan menjadi sasaran petir untuk menyalurkan arusnya ke bumi untuk dinetralisir. Efek dari gangguan akibat sambaran petir cenderung meningkat seiring dengan ketinggian dari bangunan tersebut. Sistem Proteksi Petir (SPP) merupakan salah satu komponen sistem kelistrikan yang harus memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI). Dengan demikian, implementasi sistem proteksi petir sesuai standar yang berlaku merupakan tindakan yang mampu mengurangi potensi kerusakan bangunan, peralatan dan kerugian ekonomi akibat gangguan yang ditimbulkan oleh petir (Firnando, 2024).

Merujuk pada SNI 03-7015-2004 tentang Sistem Proteksi Petir pada Bangunan Gedung, terdapat tiga metode yang dapat digunakan untuk merancang sistem proteksi petir berdasarkan penempatan dan daerah proteksinya (Mulyadi, 2023), yaitu:

1. Metode Sudut Proteksi (*Protection Angle Method*)

Metode ini secara geometris memiliki keterbatasan sehingga tidak digunakan untuk bangunan tinggi dan umumnya digunakan hanya pada bangunan rendah.

2. Metode Roda Bergulir (*Rolling Sphere Method*)

Metode ini baik untuk digunakan pada bangunan yang bentuknya rumit. Melalui metode ini, digambarkan seolah-olah ada suatu bola dengan radius R yang bergulir di atas tanah,

sekeliling struktur dan di atas struktur ke segala arah hingga bertemu dengan tanah atau struktur yang berhubungan dengan permukaan bumi sebagai penghantar. Titik sentuh bola bergulir pada struktur adalah titik yang dapat disambar petir dan pada titik tersebut harus diproteksi oleh konduktor terminasi udara.

3. Metode Jala (*Mesh Method*)

Metode ini digunakan untuk keperluan perlindungan permukaan yang datar karena bisa melindungi seluruh permukaan bangunan. Daerah yang diproteksi adalah keseluruhan daerah yang ada di dalam jala-jala.

Metode konvensional seperti jala-jala dan sudut proteksi luas digunakan dalam perancangan sistem proteksi petir di Indonesia, namun menurut Laksono dkk. (2022), metode sudut proteksi memiliki keterbatasan yang cukup signifikan apabila diaplikasikan pada bangunan dengan ketinggian diatas radius bola standar, sehingga menyebabkan terdapatnya area yang tidak terlindungi. Kemudian dalam penelitian Arief dkk. (2024) menjelaskan bahwa metode jala masih belum mampu mencegah risiko sambaran samping (*side flashing*) pada bangunan bertingkat. Pendekatan ini didasarkan pada model elektro-geometri yang memberikan korelasi fisik langsung antara arus petir dan jarak sambaran.

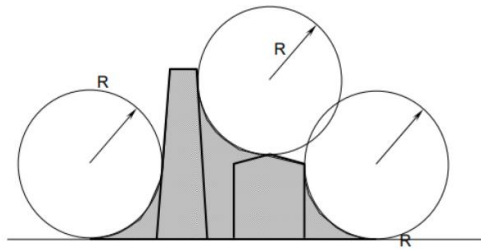
Untuk mengatasi keterbatasan kedua metode tersebut, penelitian ini secara spesifik memilih metode *rolling sphere* yang didasarkan pada keunggulannya untuk aplikasi bangunan tinggi dan rumit. Metode ini menawarkan simulasi geometris yang lebih presisi dengan menggunakan asumsi geometri bola dengan radius tertentu (R) menggelinding ke seluruh permukaan struktur. Hal ini memungkinkan identifikasi titik-titik rentan yang luput dari metode lain karena seluruh titik yang bersentuhan dengan bola dianggap sebagai area kritis yang patut diproteksi.

Oleh karena itu, tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang sistem proteksi petir eksternal yang optimal pada gedung “The Arumaya Office” yang tengah menjalani proses konstruksi di Jalan R.A. Kartini, Lebak Bulus, Cilandak, Jakarta Selatan. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk memenuhi standar SNI 03-7015-2004 dan IEC 62305, tetapi juga memberikan analisis mendalam mengenai penentuan level proteksi dan zona aman pada bangunan setinggi 104 meter ini. Hasil rancangan diharapkan menjadi model mitigasi risiko yang handal untuk melindungi struktur bangunan, peralatan, dan manusia dari bahaya sambaran langsung.

2. METODE PELAKSANAAN

Penelitian dilakukan dengan pendekatan kuantitatif, yakni melibatkan proses sistemis untuk memahami fenomena melalui proses pengumpulan data, analisis dan interpretasi data yang dapat dikuantifikasi untuk membuktikan hipotesis dalam studi tertentu (Ghanad, 2023). Dengan mengangkat “The Arumaya Office” sebagai objek kajian, diharapkan luaran dari penelitian ini adalah sebuah rancangan sistem proteksi petir eksternal bagi bangunan bertingkat dengan menggunakan metode perhitungan *rolling sphere*. Metode ini berpedoman pada SNI 03-7015-2004 tentang sistem proteksi petir pada bangunan gedung oleh Badan Standarisasi Nasional (BSN) dengan melibatkan perlakuan terhadap benda sebagai bola bulat dengan radius tertentu (R) yang bergerak ke berbagai arah hingga bersentuhan dengan permukaan benda, yang berfungsi sebagai konduktor. Seluruh titik yang bersentuhan dengan bola yang menggelinding dianggap rentan terhadap sambaran petir, sehingga perlu dilindungi dengan terminasi udara. Visualisasi terkait dengan metode ini diilustrasikan pada Gambar 1.

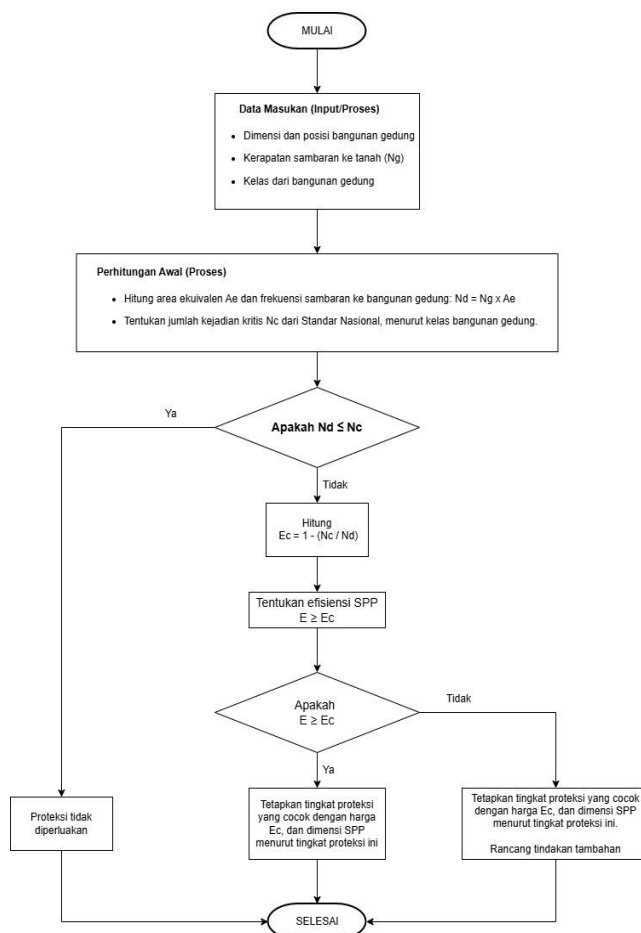
Alur penelitian ini terdapat pada diagram alir Gambar 2. Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi karakteristik geometris gedung “*The Arumaya Office*”, meliputi tinggi bangunan, panjang, dan lebar atap. Selanjutnya, data jumlah hari guruh tahunan digunakan sebagai parameter klimatologi untuk menghitung kerapatan sambaran petir ke tanah. Parameter ini mencerminkan tingkat aktivitas petir regional yang berpengaruh langsung terhadap risiko sambaran pada bangunan. Berdasarkan nilai kerapatan sambaran petir dan area cakupan ekuivalen bangunan, frekuensi sambaran petir langsung ke bangunan dihitung untuk mengevaluasi tingkat risiko. Nilai frekuensi tersebut kemudian digunakan untuk menentukan efisiensi sistem proteksi petir dan mengklasifikasikan tingkat proteksi bangunan sesuai batas toleransi sambaran yang direkomendasikan standar nasional.



Gambar 1.

Metode Bola Bergulir

Sumber: Firnando (2024)



Gambar 2.

Diagram alir analisis perencanaan proteksi petir

Sumber: SNI 03-7015-2004

Setelah tingkat proteksi ditetapkan, arus puncak petir dipilih berdasarkan klasifikasi level proteksi menurut IEC 62305. Nilai arus puncak ini digunakan untuk menghitung radius bola bergulir, yang menjadi dasar dalam penentuan zona proteksi dan penempatan terminasi udara. Seluruh bagian struktur yang berpotensi bersentuhan dengan bola imajiner dianggap sebagai titik rentan terhadap sambaran petir dan dilindungi oleh sistem terminasi udara. Perancangan sistem dilengkapi dengan pemilihan konduktor penyalur dan sistem pembumian yang memenuhi dimensi minimum sesuai SNI 03-7015-2004. Dalam perencanaan ini diasumsikan bahwa distribusi sambaran petir bersifat homogen dan data hari guruh tahunan mewakili kondisi klimatologis jangka panjang. Parameter yang digunakan sesuai standar dari SNI 03-7015-2004 meliputi densitas sambaran petir, area cakupan ekuivalen dari bangunan, frekuensi sambaran petir langsung pada bangunan, efisiensi sistem proteksi petir, jarak sambaran petir, tingkat proteksi petir dan material sistem yang digunakan. Penjelasan masing-masing parameter dijabarkan pada sub-bagian berikut.

2.1 Densitas Sambaran Petir

Parameter ini mengukur kerapatan sambaran petir ke tanah yang dihitung rata-rata per tahun menggunakan Persamaan (1).

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \text{ /km}^2/\text{tahun} \quad \dots\dots\dots (1)$$

di mana :

N_g = Kerapatan sambaran petir (jumlah sambaran/km²/tahun).

T_d = Jumlah hari guruh dalam setahun yang didapat dari BMKG

2.2 Area Cakupan Ekuivalen Dari bangunan

Parameter ini mengestimasi luasan area bangunan yang harus dilindungi oleh sistem proteksi. Area cakupan proteksi dapat dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$A_e = (A \cdot B) + (6 \cdot H \cdot (A + B)) + (9\pi \cdot H^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

di mana :

A_e = Area cakupan ekuivalen dari bangunan (m²).

A = Panjang bangunan (m).

B = Lebar bangunan (m).

H = Tinggi bangunan (m)

2.3 Frekuensi Sambaran Petir Langsung Pada Bangunan

Frekuensi sambaran petir langsung pada bangunan dapat dihitung menggunakan pendekatan pada Persamaan (1) seperti densitas sambaran petir.

2.4 Efisiensi Sistem Proteksi Petir

Efisiensi sambaran sistem penangkal petir dihitung menggunakan Persamaan (3) sebagai berikut:

$$E_c = 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad \dots\dots\dots (3)$$

di mana :

E_c = Efisiensi sistem proteksi petir.

N_c = Frekuensi sambaran petir yang diperbolehkan (Standar Nasional = 10⁻¹).

N_d = Frekuensi sambaran petir langsung (per tahun).

2.5 Jarak Sambaran Petir

Jarak sambaran petir ditentukan dengan Persamaan (4) berikut:

$$r = K \cdot I^{0,65} \dots\dots\dots (4)$$

di mana:

r = Radius atau jarak sambaran petir

K = Konstanta (10)

I = Arus puncak petir untuk level proteksi-3 sebesar 10 kA (IEC 62305)

2.6 Tingkat Proteksi

Tingkat proteksi petir dikelompokkan menjadi empat tingkat proteksi, diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1.

Tingkat Proteksi Petir

Kelas Proteksi	Efisiensi Sistem Penangkal Petir
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Tabel 2.

Dimensi Minimum Bahan SPP

Kelas Proteksi	Bahan	Terminasi Udara (mm ²)	Konduktor Penyalur (mm ²)	Pembumihan (mm ²)
I s/d IV	Cu	35	16	50
	Al	70	25	-
	Fe	50	50	80

2.7 Material Sistem Proteksi Petir

Penggunaan material untuk sistem proteksi petir memiliki standarisasi berdasarkan dari kelas proteksinya. Hal ini akan berdampak pada spesifikasi yang dibutuhkan seperti ruang terminasi udara, ukuran konduktor hingga area pembumihan. Daftar material dan spesifikasi yang dibutuhkan secara detail ditampilkan pada Tabel 2.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Gedung *The Arumaya Office* memerlukan tingkat proteksi petir Level III dengan efisiensi sistem sebesar 90%. Pemilihan tingkat proteksi ini disebabkan oleh tingginya frekuensi sambaran petir langsung (N_d) yang dipengaruhi oleh kombinasi ketinggian bangunan dan intensitas petir regional. Nilai ini menunjukkan bahwa penerapan tingkat proteksi yang lebih rendah berpotensi meninggalkan area bangunan yang tidak terlindungi secara optimal.

Metode *Rolling Sphere* bekerja dengan mensimulasikan lintasan sambaran petir melalui bola imajiner beradius 44,6 meter yang digelindingkan di seluruh permukaan struktur. Titik-titik struktur yang bersentuhan dengan bola dianggap sebagai area kritis dan dilindungi menggunakan terminasi udara. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi zona rentan yang

tidak dapat dideteksi oleh metode sudut proteksi atau metode jala, terutama pada bangunan bertingkat tinggi dengan konfigurasi atap yang kompleks.

Implikasi dari hasil penelitian ini adalah tersedianya rancangan sistem proteksi petir yang tidak hanya memenuhi standar teknis, namun juga bersifat adaptif terhadap karakteristik bangunan tinggi di wilayah dengan intensitas petir yang tinggi. Penerapan radius bola bergulir yang tepat akan memastikan struktur, peralatan, dan keselamatan manusia dapat terlindungi secara menyeluruh. Rancangan ini dapat dijadikan referensi teknis dalam perencanaan sistem proteksi petir pada bangunan bertingkat serupa, khususnya pada tahap desain konstruksi awal.

3.1 Hasil Perhitungan

3.1.1 Perhitungan Proteksi Petir

Perhitungan akan menentukan Level Proteksi untuk Sistem Penangkal Petir (SPP) dan Jarak Sambaran Petir (D_s) berdasarkan SNI 03-7015-2004. Singkatan atau simbol-simbol yang akan dipakai adalah :

- H = Tinggi bangunan – gedung (104m)
- A = Panjang lantai atap (45m)
- B = Lebar lantai atap (38m)
- A_e = Luas daerah proteksi (m^2)
- N_g = Kerapatan sambaran petir ke tanah rata-rata *park avenue* per tahun ($km^2/tahun$)
- T_d = Jumlah hari guruh per tahun (untuk Jakarta 193)
- N_c = Frekuensi sambaran petir rata-rata per tahun yang dapat diterima (10^{-1})
- E_c = Efisiensi Sistem Penangkal Petir (SPP)

Daerah Proteksi:

Daerah proteksi dapat dihitung menggunakan persamaan (2) sebagai berikut:

$$A_e = (45 \times 38) + (6 \times 104 \times (45 + 38)) + (9 \times 3,14 \times 104^2) \\ = 359,162 \, m^2$$

Kerapatan sambaran petir ke tanah rata-rata per tahun dihitung menggunakan persamaan (1) :

$$N_g = 0,04 \times 193^{1,25} / km^2 / tahun \text{ (untuk Jakarta dan sekitarnya: 193)} \\ = 28,77 / km^2 / tahun$$

Frekuensi rata-rata per tahun sambaran petir langsung dihitung menggunakan persamaan (1):

$$N_d = 28,77 / km^2 / tahun \times 359,162 m^2 \times 10^6 \\ = 10,33 \text{ sambaran/tahun}$$

Lalu, efisiensi sambaran sistem penangkal petir dihitung menggunakan persamaan (3):

$$E_c = 1 - \frac{10^{-1}}{10,33} = 0,90$$

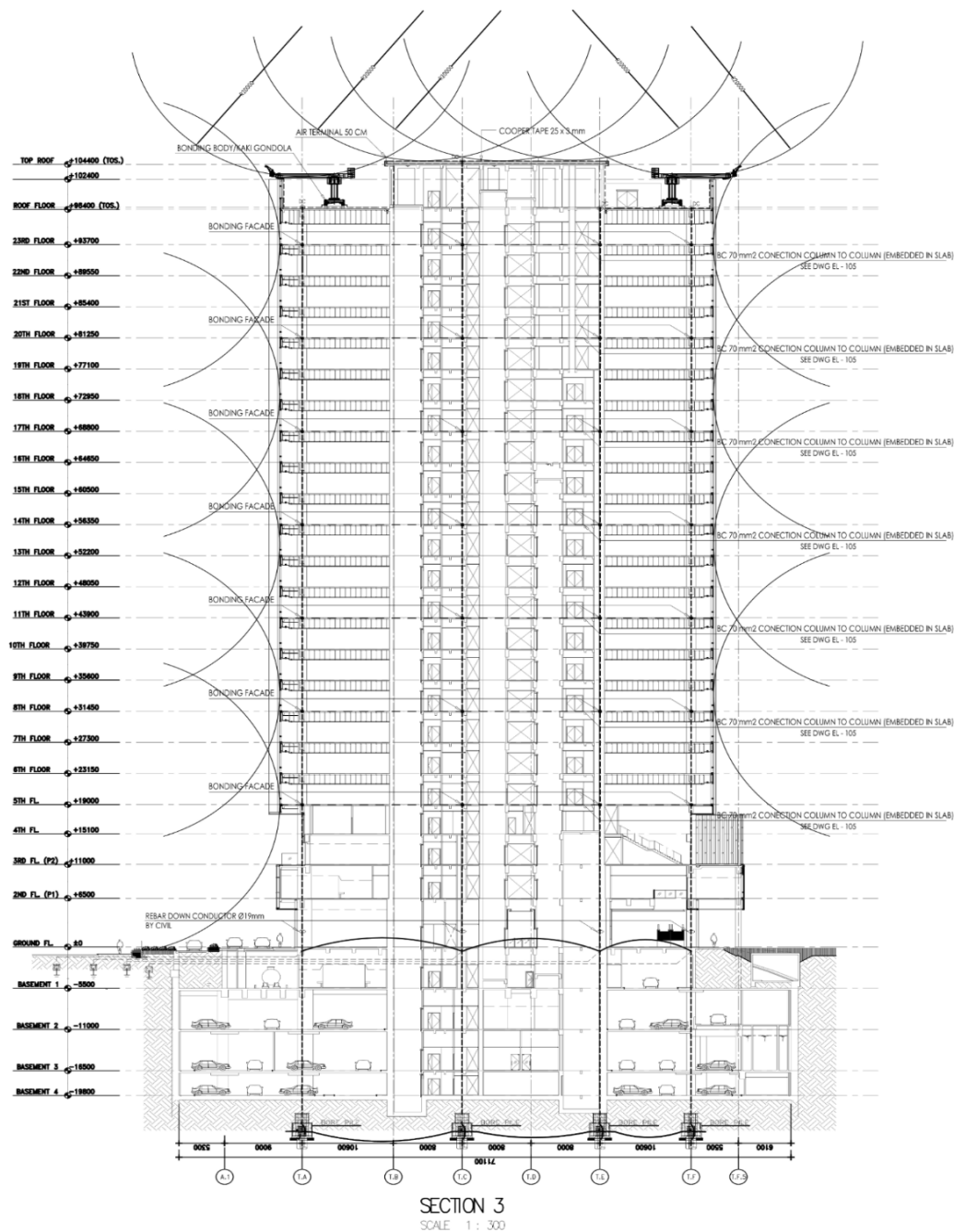
Dengan demikian Efisiensi Sistem Penangkal Petir (E_c SPP) untuk bangunan ini adalah **90%** (Level Proteksi-3). Sehingga jarak sambaran petir ditentukan dengan Persamaan (4) berikut:

$$r = 10 \times 10^{0,65} \, m \\ r = 44,6 \, m$$

3.2 Pembahasan

Berdasarkan analisis perhitungan yang dilakukan, maka rancangan sistem penangkal petir eksternal dihitung menggunakan metode *Rolling Sphere* atau *Electro Geometri Concept*. Bola dengan radius 44,6 meter digelindingkan pada struktur. Semua struktur yang terkena gelindingan bola diberi finial. Ruang atau bidang ke struktur bangunan yang tidak terkena bola adalah ruang atau bidang yang terlindungi dari petir. Dengan memakai metode rolling sphere maka seluruh struktur diasumsikan dimungkinkan dapat disambar petir.

Daerah atau Zona perlindungan suatu air terminal adalah mengikuti Persamaan (4). Sesuai dengan IEC 62305 dengan Arus Puncak Petir 10 kA didapatkan Efisiensi 90% (Level Proteksi-3) maka didapatkan nilai (r) sebesar 44,6 meter atau 45 meter.



Gambar 3.

Denah perencanaan proteksi petir eksternal gedung The Arumaya Office

Dengan demikian untuk menggambarkan daerah atau zona proteksi dipakai bola imajiner dengan radius (r) 44,6 meter yang digelindingkan di seluruh struktur bangunan. Penyusunan *air terminal* di lantai atap dilakukan sedemikian rupa sehingga semua bidang terlindungi bola imajiner baik yang *overlap* atau tidak seperti yang divisualisasikan pada Gambar 3.

Dimensi dari tiang terminal untuk bahan tembaga (sesuai SNI 03-7015-2004) adalah 35 mm² (minimum). Seluruh air terminal akan dihubungkan dengan kabel penghantar BC dengan diameter minimum 50 mm² demikian juga penghantar ke terminal *grounding* (pentanahan) sesuai dengan SNI 03-7015-2004.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis perhitungan perencanaan sistem proteksi petir menggunakan metode *Rolling Sphere* atau bola gelinding pada perencanaan gedung “The Arumaya Office” dengan tinggi bangunan 104 meter dan luas area proteksi 359.162 m², ditemukan bahwa kelas proteksi petir bangunan ini berada pada kelas Proteksi III dengan Efisiensi Sistem Penangkal Petir (E_c SPP) sebesar 90%, dengan arus puncak mencapai 10kA. Sesuai dengan IEC 62305, maka didapatkan nilai (r) sebesar 44,6 meter atau 45 meter. Penyusunan air terminal di lantai atap dilakukan sedemikian rupa sehingga semua bidang terlindungi bola imajiner baik yang *overlap* atau tidak.

Dimensi dari tiang terminal untuk bahan tembaga (sesuai SNI 03-7015-2004) adalah 35mm² (minimum). Seluruh air terminal dihubungkan dengan kabel penghantar BC dengan diameter minimum 50 mm², demikian juga penghantar ke terminal *grounding* (pentanahan) sesuai dengan SNI 03-7015-2004.

4.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah mengupayakan penggunaan data pengukuran petir *real-time* atau data historis lebih rinci yang bersumber dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) di lokasi penelitian untuk menghasilkan nilai densitas sambaran petir yang lebih akurat.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI 03-7015-2004 Sistem Proteksi pada Bangunan Gedung. <https://www.bsn.go.id>. Diakses tanggal 10 Desember 2025.
2. Du, Y., Li, B., & Chen, M. (2016). Surges induced in building electrical systems during a lightning strike. *Electric Power Systems Research*, 139, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.11.034>
3. Farkoush, S. G., Wadood, A., Khurshaid, T., Kim, C.-H., Irfan, M., & Rhee, S.-B. (2019). 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*, 7, 81903–81910. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923656>
4. Firnando, H. Tessel, D., Manab, A. (2024). Perancangan Sistem Proteksi Petir Eksternal di Gedung B Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, 12(3). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3.4735>
5. Ghanad, A. (2023). An Overview of Quantitative Research Methods. *International Journal of Multidisciplinary Research and Analysis*, 6(8), 3794-3803 <https://www.ijmra.in/v6i8/Doc/52.pdf> . Diakses tanggal 10 Desember 2025.

6. Hosea, E., Iskanto, E., & Harnyatri Luden, M. (2004). Penerapan metode jala, sudut proteksi dan bola bergulir pada sistem proteksi petir eksternal yang diaplikasikan pada Gedung W Universitas Kristen Petra. *Jurnal Teknik Elektro*, 4(1), 1–9.
7. International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 62305-1 Protection Against Lightning. <https://www.iec.ch/homepage>. Diakses tanggal 10 Desember 2025.
8. Johns, D. (2016). Designing Building Structures for Protection Against EMP and Lightning. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 5(1), 50–58. <https://doi.org/10.1109/MEMC.2016.7477134>
9. Mahira, A., Widyanto, A. N., Husnayain, F., & Fitri, I. R. (2024). Evaluasi Sistem Proteksi Petir Eksternal pada Bangunan Pusat Perbelanjaan: Studi kasus Gedung XYZ. *Jurnal Cyclotron*, 7(2). <https://doi.org/10.30651/cl.v7i02.23283>
10. Mulyadi, Z., Usrah, I., Andang, A. (2023). Perencanaan Sistem Proteksi Penangkal Petir di Stadion Sakti Lodaya Kecamatan Cisayong Kabupaten Tasikmalaya. *Journal of Energy and Electrical Engineering*, 4(2). <https://doi.org/10.37058/jeee.v4i2.6118>
11. Wulandari, A., Putra, I. A., & Rizqi, I. M. (2023). Buku Ajar Fisika Suhu & Kalor, Listrik Statis, dan Listrik Dinamis. Jawa Timur: LPPM Universitas KH. A. Wahab Hasbullah
12. Zoro, R. (2018). Sistem Proteksi Petir pada Sistem Tenaga Listrik. PT Remaja Rosdakarya