

Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Efektivitas Sistem Penyalur Petir di Gedung Main Power House (MPH) 2 Bandara I Gusti Ngurah Rai

Badrul Munir Hasibuan¹ Nurhedhi Desriyanto² Taryana³

DIV Teknik Listrik Bandara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: badrilmunir@ppicurug.ac.id¹ nurhedhi.desriyanto@ppicurug.ac.id²
taryana@ppicurug.ac.id³

Abstrak

Gedung Main Power House (MPH) 2 Bandara Internasional I Gusti Ngurah Rai merupakan fasilitas vital penyuplai daya sistem Airfield Lighting (AFL) dan navigasi yang berada di wilayah pesisir dengan aktivitas petir tinggi ($T_d = 72$ hari/tahun). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi tingkat efektivitas sistem proteksi petir eksisting, menganalisis pengaruhnya terhadap kontinuitas operasional kelistrikan, serta mengidentifikasi faktor-faktor penentu kinerjanya berdasarkan standar SNI 03-7015-2004, NF C 17-102:2011, PUIL 2020, dan IEEE Std 142-2007. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif melalui observasi fisik gedung ($55 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 22 \text{ m}$), pengukuran langsung tahanan pembumian pada 3 titik elektroda kedalaman 6 meter menggunakan Digital Earth Tester Kyoritsu 4105A, kajian logbook operasional 2023–2026, dan komputasi matematis evaluasi risiko. Metode ini dipilih karena mampu memadukan data lapangan aktual dengan perhitungan standar sehingga menghasilkan penilaian efektivitas yang terukur dan dapat dipertanggungjawabkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa gedung memerlukan proteksi Tingkat I (LPL I) dengan efisiensi $E = 99,95\%$ ($N_d = 0,2052 > N_c = 0,00010$). Pemasangan 1 unit air terminal ESE KURN R150 ($h = 3 \text{ m}$) menghasilkan radius proteksi $R_p = 47,15 \text{ m}$ yang menaungi seluruh atap gedung ($R_{\text{terjauh}} = 29,26 \text{ m}$) tanpa titik buta. Kabel BC High Voltage $1 \times 50 \text{ mm}^2$ terbukti mengeliminasi loncatan api samping (side flashing) dan meredam radiasi LEMP. Pengukuran pembumian menghasilkan nilai rata-rata $0,35 \Omega$ (memenuhi batas aman $\leq 5,0 \Omega$), didukung koordinasi SPD Tipe 2 OBO V25-B+C ($I_n = 30 \text{ kA}$, $U_p \leq 1,5 \text{ kV}$) dan Main Earth Bar (MEB). Efektivitas sistem proteksi terbukti menjamin keandalan suplai listrik bandara dengan catatan zero outage (0 kali pemadaman suplai AFL) selama periode pengamatan 2023–2026. Disimpulkan bahwa sistem penyalur petir Gedung MPH 2 bekerja efektif 100% memenuhi standar dan andal mengamankan operasional penerbangan 24 jam nonstop.

Kata Kunci: Air Terminal ESE KURN R150, Bandara I Gusti Ngurah Rai, Gedung MPH 2, Kontinuitas Operasional AFL, Proteksi Petir, Sistem Pembumian, SNI 03-7015-2004



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan beriklim tropis dengan intensitas curah hujan dan aktivitas badai petir (thunderstorm) yang sangat tinggi di dunia. Kawasan Tuban, Kecamatan Kuta, tempat berdirinya Bandara Internasional I Gusti Ngurah Rai, berbatasan langsung dengan laut dan memiliki tingkat kerawanan sambaran petir yang signifikan, dengan angka Hari Guruh Rata-Rata Tahunan (Isokeraunic Level/ T_d) mencapai 72 hari/tahun (BMKG, n.d.-a). Fenomena peluahan muatan listrik dari awan ke bumi ini membawa dua ancaman utama bagi infrastruktur, yaitu bahaya langsung (direct strike) berupa kerusakan mekanis dan kebakaran, serta bahaya tidak langsung (indirect strike) berupa induksi medan elektromagnetik petir (Lightning Electromagnetic Pulse/LEMP) yang mengancam keandalan peralatan elektronik sensitif (Indonesia, 2004). Gedung Main Power House (MPH) 2 memegang peranan krusial sebagai jantung kelistrikan di Bandara Internasional I Gusti Ngurah Rai, berfungsi sebagai pusat penerima dan penyuplai utama tenaga listrik bagi infrastruktur kritis

penerbangan, termasuk jaringan Airfield Lighting (AFL) dan sistem navigasi bandara. Tanpa rancangan Lightning Protection System (LPS) yang memadai, gedung berfasilitas vital ini berisiko mengalami kelumpuhan operasional akibat loncatan bunga api samping (side flashing) atau tegangan sentuh yang dapat merusak komponen inverter Constant Current Regulator (CCR) dan panel distribusi, sehingga mengancam keselamatan penerbangan.

Hingga saat ini sistem suplai daya Gedung MPH 2 terpantau beroperasi tanpa riwayat pemadaman (zero outage). Namun demikian, prinsip zero tolerance for failure dalam keselamatan penerbangan sipil menuntut evaluasi keandalan instalasi tidak hanya menunggu terjadinya kegagalan, melainkan dilakukan secara preventif dan prediktif. Kewajiban evaluasi ini diatur dalam PUIL 2020 (SNI, 2020), SNI 03-7015-2004 (Indonesia, 2004), serta Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor KP 76 Tahun 2017 tentang Pedoman Teknis Fasilitas Kelistrikan Bandar Udara, yang mewajibkan evaluasi periodik peralatan penyalur petir setiap 2 tahun. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa efektivitas sistem proteksi petir sangat dipengaruhi oleh konfigurasi terminasi udara, kualitas material konduktor, serta kondisi sistem pembumian. Fitriani et al. (2023) menganalisis pentanahan gardu induk akibat surja petir menggunakan metode elemen hingga dan menekankan pentingnya nilai resistansi tanah rendah dalam mendisipasikan arus impuls. Ari Saputro & Oetomo (2020) membandingkan perhitungan dan simulasi ETAP untuk sistem pentanahan grid-rod pada pembangkit listrik tenaga mesin gas, menunjukkan bahwa konfigurasi elektroda paralel signifikan menurunkan tahanan pembumian. Putra et al. (2024) mengevaluasi sistem proteksi petir eksternal konvensional pada gedung industri dan menekankan pentingnya radius proteksi yang menaungi seluruh geometri atap. Kodir et al. mengkaji sistem penangkal petir metode elektrostatis pada bangunan rumah sakit sebagai preseden penerapan teknologi Early Streamer Emission (ESE) pada fasilitas vital.

Meskipun kajian sistem proteksi petir telah banyak dilakukan, penelitian pada fasilitas kelistrikan vital bandara di kawasan pesisir dengan aktivitas petir tinggi serta korelasinya terhadap kontinuitas operasional Airfield Lighting masih terbatas. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada integrasi evaluasi teknis multi-standar (SNI 03-7015-2004, NF C 17-102:2011, PUIL 2020, dan IEEE Std 142-2007) yang dipadukan dengan data historis kontinuitas operasional empat tahun (2023–2026) pada objek fasilitas navigasi penerbangan bertaraf internasional. Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi kondisi dan kelayakan komponen sistem penyalur petir di Gedung MPH 2, menganalisis tingkat efektivitasnya dalam melindungi fasilitas dari ancaman petir langsung maupun tidak langsung, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas kinerja sistem tersebut.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis/ Tahun	Judul	Fokus Kajian	Metode	Relevansi terhadap Penelitian Ini
1	Fitriani et al. (2023)	Analisis Pentanahan Gardu Induk Akibat Surja Petir Menggunakan Finite Elemen Method	Resistansi tanah dan disipasi arus impuls petir	Simulasi elemen hingga	Menjadi rujukan prinsip disipasi arus petir pada sistem pembumian
2	Ari Saputro & Oetomo (2020)	Perbandingan Perhitungan dan Simulasi ETAP Sistem Pentanahan Grid-Rod pada PLTMG	Konfigurasi elektroda grid-rod paralel	Perhitungan analitis dan simulasi ETAP	Dasar perhitungan tahanan pembumian sistem paralel yang diadaptasi (Dwight Formula)
3	Putra et al. (2024)	Evaluasi Sistem Proteksi Petir Eksternal Konvensional pada Gedung Industri	Radius proteksi terminasi udara terhadap geometri atap	Observasi dan perhitungan standar	Acuan metode evaluasi cakupan radius proteksi terhadap dimensi bangunan
4	Kodir, Pebrianto, & Hartanto	Analisis Sistem Penangkal Petir dengan Metode Elektrostatis pada Rumah Sakit Indriati Boyolali	Penerapan air terminal ESE pada fasilitas vital	Studi kasus deskriptif	Preseden penerapan teknologi ESE pada bangunan fasilitas kritis

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada instalasi sistem proteksi petir (eksternal dan internal) di Gedung Main Power House (MPH) 2 Bandara Internasional I Gusti Ngurah Rai, Tuban, Badung, Bali, berlangsung selama 7 bulan dari Agustus 2025 hingga Februari 2026. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif yang memadukan observasi fisik, pengukuran teknis langsung, studi dokumentasi, dan komputasi matematis berbasis standar regulasi teknis. Fokus penelitian meliputi empat aspek: (1) pemeriksaan kondisi fisik instalasi air terminal Early Streamer Emission (ESE) KURN R150 beserta tiang penyangga dan kabel konduktor penyalur (down conductor) koaksial $1 \times 50 \text{ mm}^2$; (2) pemeriksaan dan pengukuran tahanan pembumian pada 3 titik elektroda batang (ground rod 3/4 inci, kedalaman 6 meter) yang terhubung paralel; (3) pemeriksaan sistem proteksi internal berupa gawai proteksi surja (Surge Protective Device/SPD Tipe 2) pada panel Main Distribution Panel (MDP) dan sistem penyetaraan potensial (Equipotential Bonding) pada Main Earth Bar (MEB); serta (4) analisis faktor-faktor teknis, material, dan lingkungan yang memengaruhi efektivitas kinerja sistem guna menjamin kontinuitas suplai daya beban vital bandara (Airfield Lighting/AFL).

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui tiga cara. Pertama, observasi lapangan (field observation) terhadap kondisi fisik seluruh komponen sistem proteksi petir, meliputi posisi air terminal di atap, kondisi klem pengikat kabel koaksial, kondisi bak kontrol (ground pit), dan indikator modul SPD pada panel MDP. Kedua, pengukuran teknis (technical measurement) berupa pengukuran langsung tahanan pentanahan pada 3 titik elektroda menggunakan Digital Earth Resistance Tester Kyoritsu 4105A dengan metode 3 titik (fall of potential method) sesuai IEEE Std 81-2012. Ketiga, studi dokumentasi (documentation) berupa gambar tata letak gedung, diagram satu garis (Single Line Diagram) sistem distribusi dan pembumian, data hari guruh (Td) dari BMKG, logbook pemeliharaan fasilitas kelistrikan periode 2023–2026, serta foto dokumentasi pengujian lapangan. Data yang diperoleh diolah melalui komputasi matematis berbasis formulasi standar. Kerapatan sambaran petir ke tanah (N_g) dihitung menggunakan formula SNI 03-7015-2004: $N_g = 0,04 \times (T_d)^{1,25}$ (sambaran/km²/tahun). Luas area tangkapan ekuivalen bangunan (A_e) dihitung berdasarkan dimensi fisik gedung (panjang L, lebar W, tinggi H) dengan persamaan $A_e = (L \times W) + 2(3H)(L + W) + \pi(3H)^2$. Frekuensi sambaran langsung tahunan (N_d) diperoleh dari $N_d = N_g \times 10^{-6} \times A_e \times C_1$, sedangkan frekuensi sambaran yang dapat diterima (N_c) dihitung dengan $N_c = (1,5 \times 10^{-3})/C$, di mana C merupakan hasil perkalian koefisien struktur, isi gedung, peruntukan bangunan, dan konsekuensi sambaran. Efisiensi proteksi (E) yang menentukan Tingkat Proteksi Petir (Lightning Protection Level/LPL) diperoleh dari $E = 1 - (N_c/N_d)$.

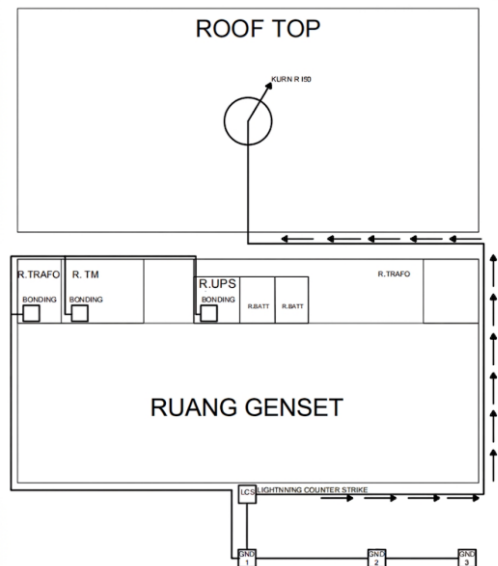
Radius proteksi aktif air terminal ESE dihitung menggunakan standar NF C 17-102:2011 dengan persamaan $R_p(h) = \sqrt{[2rh - h^2 + \Delta L(2r + \Delta L)]}$ untuk $h \geq 5 \text{ m}$, dengan modifikasi proporsional untuk ketinggian aktual tiang, di mana r adalah radius bola bergulir sesuai LPL dan ΔL adalah pertambahan panjang lompatan ionisasi muka ($\Delta L = v \times \Delta T$). Nilai tahanan pentanahan sistem paralel dianalisis secara teoretis menggunakan Dwight Formula sesuai IEEE Std 142-2007, yaitu $R_1 = [\rho/(2\pi L)] \times [\ln(4L/a) - 1]$ untuk elektroda tunggal, kemudian digabungkan menjadi $R_{\text{total}} = R_1/(n \times \eta)$ untuk konfigurasi n elektroda paralel dengan faktor efisiensi η , dan hasilnya dibandingkan terhadap data pengukuran langsung di lapangan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Gedung Main Power House (MPH) 2 merupakan fasilitas kelistrikan paling vital di lingkungan Bandara Internasional I Gusti Ngurah Rai, berfungsi sebagai pusat penerima, pengatur, dan pendistribusi utama energi listrik dari penyulang PLN dan pembangkit darurat

bandara (Emergency Diesel Generator) menuju seluruh beban operasional sisi udara dan sisi darat, termasuk Airfield Lighting (AFL), Instrument Landing System (ILS), radar navigasi DVOR/DME, terminal penumpang, dan Uninterruptible Power Supply (UPS). Gedung ini memiliki struktur beton bertulang dengan atap dak beton mendatar berdimensi panjang (L) = 55 meter, lebar (W) = 20 meter, dan tinggi (H) = 22 meter, dengan tiang penyangga air terminal setinggi h = 3 meter sehingga elevasi total ujung penangkal petir mencapai 25 meter dari permukaan tanah.



Gambar 1. Diagram Satu Garis (Single Line Diagram) Sistem Penyalur Petir Gedung MPH 2

Sistem proteksi petir eksisting terdiri atas sistem terminasi udara berupa 1 unit air terminal non-radioaktif tipe Early Streamer Emission (ESE) merek KURN R150 yang dipasang vertikal di titik tengah atap; konduktor penyalur (down conductor) berupa kabel Bare Copper (BC) High Voltage $1 \times 50 \text{ mm}^2$ berisolasi XLPE yang menghubungkan air terminal ke sistem pembumian; sistem pembumian berupa 3 titik bak kontrol dengan elektroda tembaga pejal diameter 3/4 inci sedalam 6 meter yang terhubung paralel; sistem proteksi internal berupa SPD Tipe 2 pada panel MDP dengan kapasitas arus pelepasan nominal $I_n = 30 \text{ kA}$ dan tingkat proteksi tegangan residu $U_p \leq 1,5 \text{ kV}$; serta penyetaraan potensial (equipotential bonding) melalui Main Earth Bar (MEB) tembaga $50 \times 5 \text{ mm}$ yang menyatukan pembumian seluruh peralatan pada satu sistem pembumian bersama. Rekapitulasi spesifikasi teknis seluruh komponen disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Data Spesifikasi Teknis Sistem Proteksi Petir Gedung MPH 2

No	Komponen Sistem	Spesifikasi Teknis Aktual di Lapangan
1	Dimensi Fisik Gedung	Panjang = 55 m, Lebar = 20 m, Tinggi Atap = 22 m (Atap Dak Beton)
2	Air Terminal Head	1 Unit ESE (Elektrostatis) Merk KURN R150 (Non-Radioaktif)
3	Tinggi Tiang Penyangga	h = 3 meter di atas atap (Elevasi total Ht = 25 meter dari tanah)
4	Waktu Emisi Dini (ΔT)	$\Delta T = 60 \mu\text{s}$ (Panjang lompatan ionisasi $\Delta L = 60 \text{ meter}$)
5	Down Conductor	Kabel BC High Voltage $1 \times 50 \text{ mm}^2$ (XLPE Insulated & Screened)
6	Elektroda Pembumian	3 Batang Solid Copper Rod Diameter 3/4" (19 mm)
7	Kedalaman Ground Rod	Kedalaman tembus L = 6 meter per batang
8	Konduktor Interkoneksi	Kabel Bare Copper (BC 50 mm^2), konfigurasi 3 tarikan paralel
9	Proteksi Internal (SPD)	SPD Tipe 2 Kelas II ($I_n = 30 \text{ kA}$, $I_{\text{max}} = 50 \text{ kA}$, $U_p \leq 1,5 \text{ kV}$)
10	Equipotential Bonding	Main Earth Bar (MEB) Tembaga $50 \times 5 \text{ mm}$ di Ruang Panel MDP
11	Hari Guruh Wilayah (Td)	Td = 72 hari/tahun (Data BMKG Tuban, Badung, Bali)



Gambar 2. Air Terminal ESE KURN R150 pada Atap Gedung MPH 2

Pengukuran tahanan pembumian dilakukan langsung di lokasi bak kontrol menggunakan Digital Earth Resistance Tester Kyoritsu 4105A yang telah terkalibrasi, dengan metode 3 titik (fall of potential method) sesuai IEEE Std 81-2012 pada kondisi tanah kering. Hasil pengukuran pada ketiga titik elektroda serta nilai gabungan sistem paralel disajikan pada Tabel 3.



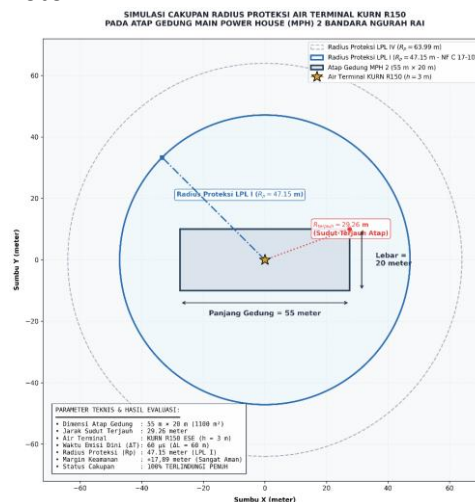
Gambar 3. Bak Kontrol Pembumian (Ground Pit) Gedung MPH 2

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengukuran Tahanan Pembumian

Titik Pengukuran	Posisi Bak Kontrol Grounding	Nilai Terukur (Ω)	Batas Standar SNI	Status Kelaikan
Ground Rod 1	Bak Kontrol Sisi Barat (Dekat Ruang Trafo & Genset)	1,51	$\leq 5,0$	MEMENUHI
Ground Rod 2	Bak Kontrol Sisi Utara (Dekat Ruang Inverter AFL)	0,03	$\leq 5,0$	MEMENUHI
Ground Rod 3	Bak Kontrol Sisi Timur (Dekat Panel Distribusi MDP)	0,96	$\leq 5,0$	MEMENUHI
Rata-rata Sistem	Sistem Pembumian Terinterkoneksi Paralel	0,35	$\leq 5,0$	MEMENUHI

Berdasarkan Tabel 3, diperoleh nilai tahanan pembumian rata-rata sistem gabungan sebesar $0,35 \Omega$, jauh di bawah batas maksimum SNI 03-7015-2004 dan SNI 0225:2020 sebesar $\leq 5,0 \Omega$, serta mendekati batas rekomendasi ideal sistem kelistrikan vital bandara ($\leq 2,0 \Omega$). Analisis efektivitas sistem dilakukan melalui perhitungan berbasis SNI 03-7015-2004, NF C 17-102:2011, dan Dwight Formula. Berdasarkan data hari guruh tahunan $T_d = 72$ hari/tahun dari BMKG Tuban, diperoleh kerapatan sambaran petir ke tanah $N_g = 0,04 \times (72)^{1,25} = 8,314$ sambaran/ km^2 /tahun. Luas area tangkapan ekivalen bangunan dihitung dari dimensi gedung menghasilkan $A_e = 24.684,77 \text{ m}^2$ ($0,024685 \text{ km}^2$). Dengan koefisien letak bangunan $C_1 = 1,0$, frekuensi sambaran langsung tahunan diperoleh $N_d = N_g \times A_e \times C_1 \times 10^{-6} = 0,2052$ sambaran/tahun, atau setara periode ulang sambaran $T = 1/N_d \approx 4,87$ tahun per sambaran.

Frekuensi sambaran yang dapat diterima dihitung dengan koefisien pembobot risiko total $C = C2 \times C3 \times C4 \times C5 = 1,0 \times 3,0 \times 1,0 \times 5,0 = 15,0$ (mempertimbangkan struktur beton bertulang, fungsi gedung sebagai pusat distribusi kelistrikan vital, keberadaan petugas teknisi 24 jam, dan konsekuensi fatal terhadap kontinuitas penerbangan), sehingga diperoleh $N_c = (1,5 \times 10^{-3})/15,0 = 0,00010$ sambaran/tahun. Karena $N_d (0,2052)$ jauh lebih besar daripada N_c ($0,00010$), Gedung MPH 2 dipastikan memerlukan sistem proteksi petir, dengan efisiensi minimum yang harus dicapai $E = 1 - (N_c/N_d) = 1 - 0,000487 = 0,99951$ atau 99,95%. Karena $E > 0,98$, Gedung MPH 2 diklasifikasikan ke dalam Tingkat Proteksi Petir Tingkat I (LPL I) sesuai SNI 03-7015-2004. Analisis radius proteksi terminasi udara ESE KURN R150 menggunakan standar NF C 17-102:2011 menunjukkan bahwa jarak terjauh dari titik tengah atap menuju sudut gedung (R_{terjauh}) adalah 29,26 meter berdasarkan perhitungan Pythagoras terhadap dimensi atap $55 \text{ m} \times 20 \text{ m}$. Dengan waktu emisi dini $\Delta T = 60 \mu\text{s}$ ($\Delta L = 60 \text{ meter}$) dan radius bola bergulir $r = 20 \text{ meter}$ untuk LPL I, radius proteksi aktif pada ketinggian tiang $h = 3 \text{ meter}$ dihitung sebesar $R_p = 47,15 \text{ meter}$.



Gambar 4. Simulasi Cakupan Radius Proteksi Air Terminal KURN R150

Karena radius proteksi aktif ($R_p = 47,15 \text{ m}$) jauh melampaui jarak terjauh atap gedung ($R_{\text{terjauh}} = 29,26 \text{ m}$), maka secara matematis 1 unit KURN R150 terbukti mampu melindungi 100% seluruh luasan atap seluas 1.100 m^2 , fasad dinding vertikal, serta area perimeter gardu transformator di sekeliling Gedung MPH 2 tanpa meninggalkan titik buta (blind spot). Analisis teoretis sistem pembumian menggunakan Dwight Formula (IEEE Std 142-2007) dengan resistivitas tanah pesisir aluvium Tuban ($\rho \approx 32 \Omega \cdot \text{m}$) dan elektroda tembaga berjari-jari $0,0095 \text{ m}$ sepanjang 6 meter menghasilkan tahanan satu batang elektroda $R_1 = 5,80 \Omega$. Untuk konfigurasi 3 batang elektroda paralel dengan faktor efisiensi $\eta = 0,88$, diperoleh tahanan gabungan teoretis $R_{\text{total}} = R_1/(n \times \eta) = 5,80/(3 \times 0,88) = 2,20 \Omega$. Terdapat selisih antara nilai teoretis ($2,20 \Omega$) dengan hasil pengukuran langsung di lapangan ($0,35 \Omega$), namun kedua nilai tersebut tetap memenuhi kriteria PUIL 2020 yaitu di bawah 5Ω , sehingga penelitian ini menggunakan data pengukuran langsung sebagai acuan evaluasi kelaikan. Evaluasi kepatuhan teknis sistem penyalur petir Gedung MPH 2 terhadap standar regulasi nasional dan internasional (SNI 03-7015-2004, NF C 17-102:2011, dan SNI 0225:2020/PUIL 2020) disajikan pada Tabel 4, mencakup integrasi kinerja proteksi eksternal dan internal.

Tabel 4. Matriks Evaluasi Kepatuhan Sistem Proteksi Petir Gedung MPH 2 terhadap Standar

No	Parameter Teknis	Kondisi Eksisting Gedung MPH 2	Standar Acuan	Status Kepatuhan
1	Air Terminal Head	KURN R150 ESE (h = 3 m, vertikal di atap)	NF C 17-102 (2011)	Memenuhi (100%)
2	Cakupan Proteksi	Radius Rp = 47,15 m (> R _{terjauh} = 29,26 m)	Melindungi seluruh atap & dinding	Memenuhi (100%)
3	Material Down Conductor	Kabel BC High Voltage 1 × 50 mm ²	Luas penampang tembaga ≥ 50 mm ²	Memenuhi (100%)
4	Ketahanan Dielektrik	Isolasi XLPE kabel koaksial > 100 kV	Bebas bahaya side flashing	Memenuhi (100%)
5	Peredaman LEMP	Layar pelindung logam koaksial dibumikan	Meredam radiasi medan magnet ke panel	Memenuhi (100%)
6	Grounding System	3 Rod Tembaga 3/4", kedalam tembuh 6 m	Menembus muka air tanah pesisir	Memenuhi (100%)
7	Tahanan Pentanahan	Nilai terukur rata-rata 0,35 Ω	Maksimal ≤ 5,0 Ω (SNI 03-7015/PUIL)	Memenuhi (100%)
8	Proteksi Internal (SPD)	SPD Tipe 2 (In = 30 kA, Up ≤ 1,5 kV) pada MDP	Proteksi surja tegangan lebih transien	Memenuhi (100%)
9	Equipotential Bonding	Main Earth Bar (MEB) tembaga 50 × 5 mm	Penyetaraan potensial bodi panel (ΔV=0)	Memenuhi (100%)

Untuk membuktikan hubungan antara efektivitas sistem proteksi petir dan kontinuitas operasional, dilakukan analisis data logbook pemeliharaan dan rekaman gangguan unit Airport Electrical Services selama periode 2023 hingga Juli 2026, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Catatan Gangguan Kelistrikan dan Kontinuitas Operasional MPH 2 (2023–2026)

Tahun Operasional	Jumlah Hari Guruh (Td)	Kejadian Gangguan Pasokan AFL	Kerusakan Modul/Peralatan MDP	Status Kontinuitas Layanan
2023	68 Hari Guruh	0 Kali (Nihil)	0 Unit Rusak	100% Andal (Zero Outage)
2024	74 Hari Guruh	0 Kali (Nihil)	0 Unit Rusak	100% Andal (Zero Outage)
2025	71 Hari Guruh	0 Kali (Nihil)	0 Unit Rusak	100% Andal (Zero Outage)
2026 (s.d. Juli)	36 Hari Guruh	0 Kali (Nihil)	0 Unit Rusak	100% Andal (Zero Outage)

Pembahasan

Data pada Tabel 5 membuktikan secara empiris bahwa efektivitas sistem proteksi petir terpasang berkorelasi positif dan linier terhadap terjaminnya kontinuitas pelayanan operasional penerbangan, ditandai dengan nihilnya kejadian pemadaman listrik (zero outage) dan ketiadaan kerusakan perangkat kendali AFL sepanjang empat tahun pengamatan, meskipun jumlah hari guruh tahunan berfluktuasi antara 36 hingga 74 hari. Mekanisme perlindungan bekerja melalui dua lapis proteksi terkoordinasi: pada sisi eksternal, air terminal KURN R150 menangkap sambaran dan menyalurkannya melalui inti tembaga kabel koaksial 50 mm² langsung ke sistem pembumian, dengan isolasi XLPE tebal mencegah loncatan api samping ke bodi panel kubikel maupun dinding gedung; pada sisi internal, gelombang surja transien akibat induksi LEMP pada kabel saluran masuk daya dipotong oleh SPD Tipe 2 pada panel MDP dalam orde nanodetik, dengan tegangan surja sisa dibatasi pada Up ≤ 1,5 kV dan energinya dialirkan ke Main Earth Bar, sehingga komponen semikonduktor pada inverter Constant Current Regulator (CCR) AFL terlindungi dari kerusakan isolasi.

Berdasarkan hasil analisis komputasi matematis, observasi fisik, dan pengujian lapangan, teridentifikasi empat faktor utama yang menentukan efektivitas kinerja sistem penyalur petir pada Gedung MPH 2. Pertama, desain dan karakteristik terminasi udara ESE: penggunaan air terminal aktif KURN R150 dengan waktu pemicuan emisi dini $\Delta T = 60 \mu s$ dan tiang h = 3 meter

menghasilkan radius proteksi aktif $R_p = 47,15$ meter yang menaungi seluruh geometri atap $55 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, meniadakan potensi sambaran langsung pada atap maupun dinding samping gedung. Kedua, kualitas material dan struktur kabel penyalur: kabel BC High Voltage $1 \times 50 \text{ mm}^2$ memberikan proteksi ganda berupa penampang tembaga yang mengalirkan arus impuls secara lancar, isolasi XLPE tebal ($> 100 \text{ kV}$) yang mengeliminasi risiko side flashing, dan lapisan metallic screen yang dibumikan untuk meredam radiasi LEMP ke ruang panel. Ketiga, konfigurasi pembumian dan kedalaman elektroda: penanaman 3 batang ground rod tembaga pejal $3/4$ inci hingga kedalaman 6 meter berhasil mencapai lapisan air tanah pesisir Tuban yang kaya elektrolit ion garam dengan resistivitas rendah ($\rho \approx 32 \Omega \cdot \text{m}$), menghasilkan tahanan pembumian yang sangat efektif mendispersikan arus petir. Keempat, integrasi proteksi internal dan penyetaraan potensial: SPD Tipe 2 Kelas II pada MDP yang terkoordinasi dengan Main Earth Bar $50 \times 5 \text{ mm}$ meniadakan beda potensial antar-rangka logam ($\Delta V = 0$) serta memotong surja tegangan lebih transien sebelum mencapai peralatan sensitif.

Dibandingkan dengan penelitian Ari Saputro & Oetomo (2020) yang menekankan efisiensi konfigurasi grid-rod pada instalasi pembangkit, hasil penelitian ini memperkuat temuan bahwa konfigurasi elektroda paralel dengan kedalaman penetrasi hingga lapisan air tanah secara signifikan menurunkan resistansi pembumian di bawah nilai teoretis perhitungan permukaan kering. Sementara itu, dibandingkan dengan kajian Fitriani et al. (2023) mengenai disipasi arus impuls pada gardu induk, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi radius proteksi ESE yang melampaui dimensi bangunan dengan sistem pembumian bernilai rendah menghasilkan margin keamanan yang jauh melampaui ambang batas regulasi, sebagaimana dibuktikan oleh rekam jejak zero outage selama empat tahun observasi pada fasilitas kelistrikan vital bandara.

KESIMPULAN

Instalasi sistem penyalur petir di Gedung MPH 2 berada dalam kondisi sangat baik dan laik operasi, memenuhi standar PUIL 2020 dan KP 76 Tahun 2017. Seluruh komponen utama, mulai dari terminasi udara elektrostatis ESE, kabel penyalur, sistem pembumian dengan nilai tahanan rata-rata $0,35 \Omega$ (memenuhi batas aman di bawah $5,0 \Omega$), hingga gawai proteksi surja (SPD) dan equipotential bonding, terpasang secara terintegrasi dan berfungsi normal. Sistem penyalur petir terbukti bekerja sangat efektif dalam melindungi fasilitas gedung dari ancaman sambaran langsung maupun induksi medan elektromagnetik petir (LEMP). Radius proteksi aktif terminasi udara ($R_p = 47,15 \text{ m}$) mampu menaungi seluruh luasan atap bangunan ($R_{\text{terjauh}} = 29,26 \text{ m}$) tanpa titik buta, dengan efisiensi proteksi $E = 99,95\%$ yang mengklasifikasikan gedung pada Tingkat Proteksi I (LPL I), didukung koordinasi proteksi internal yang meredam lonjakan tegangan transien. Efektivitas ini dibuktikan secara empiris melalui catatan zero outage pada periode 2023–2026. Efektivitas kinerja sistem dipengaruhi oleh perpaduan empat faktor utama: desain dan karakteristik terminasi udara aktif ESE, keandalan kabel koaksial dalam mencegah loncatan api samping, kondisi geologi tanah pesisir yang mempercepat disipasi arus pembumian, serta koordinasi pemotongan tegangan lebih oleh SPD pada equipotential bonding. Mengingat lokasi Bandara I Gusti Ngurah Rai berada di kawasan pesisir dengan salinitas udara tinggi, disarankan untuk rutin memberikan lapisan pelindung anti-korosi (grease bimetal) pada klem sambungan di dalam bak kontrol serta memastikan tutup bak kontrol selalu tertutup rapat guna mencegah percepatan korosi galvanik pada sambungan elektroda.



DAFTAR PUSTAKA

- Ari Saputro, I. N., & Oetomo, P. (2020). Perbandingan Perhitungan Dan Simulasi Etap Sistem Pentanahan Grid-Rod Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas. *Sinusoida*, 22(4), 43–53. <https://doi.org/10.37277/s.v22i4.870>
- Arifin, F. (2006). Perancangan Dan Simulasi Sistem Pentanahan Menggunakan Etap (Vol. 2, Issue 3). BMKG. (n.d.-a). Buletin BMKG.
- BMKG. (n.d.-b). Leaflet Matahari. <https://iklim.bmkg.go.id/bmkgadmin/storage/brosur/Leaflet%20Matahari.pdf>
- Faturrachman, B., Fadel, M. H., Rizal, A. D., & Hasanuddin, Z. B. (2023). Perbaikan Pentanahan Akibat Sambaran Petir Pada Transmission Line Tello-Bosowa Pada Tower 58. *Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek*, 01(05), 1–10.
- Fitriani, A., Syafriwel, S., Hidayat, J., Panjaitan, J., & Syahputra, S. A. (2023). Analisis Pentanahan Gardu Induk Akibat Surja Petir Menggunakan Finite Elemen Method. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(2), 210–215. <https://doi.org/10.37905/jjee.v5i2.20732>
- IEC. (2007). High-Voltage Switchgear and Controlgear. 1–9.
- IEEE Std 81. (2012). IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. IEEE Power and Energy Society.
- Indonesia, S. N. (2004). Sistem Proteksi Petir Pada Bangunan Gedung (SNI 03-7015-2004).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1974). IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Std 142-2007).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2015). IEEE Std 80-2013 – IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- Kodir, A., Pebrianto, A., & Hartanto, S. (n.d.). Analisis Sistem Penangkal Petir Dengan Metode Elektrostatis Pada Rumah Sakit Indriati Boyolali. 13, 8–16.
- KP 76. (2017). Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor KP 76 Tahun 2017 tentang Pedoman Teknis Fasilitas Kelistrikan Bandar Udara.
- Pratiwi, F. R., & Suryanto, A. (2021). Analisis Sistem Grounding Pada Gardu Induk 150 kV Temanggung Dengan Simulasi Software Etap. *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, 5(2), 114–122. <https://doi.org/10.36277/jteuniba.v5i2.91>
- Putra, I. Z., Aerland, A., Anas, P., & Nakul, F. (2024). Evaluasi Sistem Proteksi Petir Eksternal Konvensional Pada Gedung PT Infineon Batam-3.
- Saputra, C. D. (2023). Analisa Sistem Pentanahan Dengan Metode Kombinasi Grid & Rod Pada Gardu Induk 150 kV BSB.
- SNI. (2020). Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2020 (PUIL 2020). Badan Standardisasi Nasional.
- Staikos, E. T., Hadjicostas, A. Y., Datsios, Z. G., Peppas, G. D., Antrias, C., Zagkoumidis, K. P., Ayfantopoulou, G., & Tsovilis, T. E. (2025). Surge Protection of Charging Stations Against Impinging Overvoltages Due to Negative Lightning Strikes to Incoming Medium Voltage Line. 2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2023, PP, 1–12. <https://doi.org/10.1109/IAS54024.2023.10406748>
- Stasiun Klimatologi Bali. (2023). Data Klimatologi Provinsi Bali Tahun 2023. <https://staklim-bali.bmkg.go.id/wp-content/uploads/2024/10/BULTAH-2023.pdf>
- Sugiharto, A. (2019). Pentanahan untuk Perlindungan Peralatan dan Bangunan Gedung. *Majalah Ilmiah Swara Patra*, 9, 34–42.