

OPTIMALISASI SISTEM PENANGKAL PETIR DAN IMPLEMENTASI SPD TYPE 2 SUP2H-PV SEBAGAI PROTEKSI PANEL SURYA ROOFTOP 9 LANTAI

Mas'uda Rosyadi¹, Richard Antonius Rambung^{1*}, Chairul Gagarin Irianto¹, Dianing Novita Nurmala Putri¹,
Tyas Kartika Sari¹, Amir Akbar Wicaksono¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti

Jl. Kyai Tapa No.1, Grogol, Jakarta Barat 11440, Indonesia

*Corresponding author: mas'uda.rosyadi@trisakti.ac.id

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *rooftop* yang dipasang pada bangunan bertingkat memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap sambaran petir langsung maupun tegangan lebih transien akibat induksi petir. Kondisi tersebut dapat menimbulkan kerusakan pada modul fotovoltaik, inverter, baterai, serta menurunkan keandalan sistem apabila tidak dilengkapi dengan sistem proteksi yang sesuai standar. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan sistem proteksi petir pada instalasi PLTS *rooftop* Gedung Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti melalui evaluasi sistem penangkal petir eksternal dan implementasi *Surge Protective Device* (SPD) Type 2 SUP2H-PV pada sisi DC sistem fotovoltaik. Penelitian diawali dengan survei kondisi eksisting, pengumpulan data teknis bangunan dan sistem PLTS berkapasitas 300 Wp, kemudian dilakukan analisis risiko sambaran petir berdasarkan SNI IEC 62305-2 serta penentuan zona proteksi menggunakan metode *rolling sphere* sesuai SNI IEC 62305-3. Selanjutnya dirancang sistem proteksi petir eksternal dan penempatan SPD Type 2 SUP2H-PV ($U_{cpv} = 500$ V DC, $I_n = 20$ kA, $I_{max} = 40$ kA, $U_p = 2,8$ kV) pada DC *combiner box* dan *input inverter* mengacu pada IEC 61643-31. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai risiko R_1 melebihi batas tolerabel (10^{-5}), sehingga instalasi memerlukan *Lightning Protection Level* (LPL) II. Optimalisasi sistem menghasilkan cakupan proteksi yang memenuhi kebutuhan area PLTS *rooftop*, sedangkan implementasi SPD memberikan koordinasi proteksi yang sesuai terhadap tegangan lebih transien dengan nilai U_p lebih rendah dibandingkan kemampuan tahan *impuls inverter* (U_w). Integrasi sistem penangkal petir eksternal dan SPD terbukti meningkatkan keandalan, keselamatan, dan kontinuitas operasi PLTS *rooftop* serta memberikan acuan teknis bagi penerapan sistem proteksi petir pada instalasi fotovoltaik di bangunan bertingkat sesuai standar nasional dan internasional.

Kata kunci: PLTS *rooftop*; sistem penangkal petir; *Surge Protective Device* (SPD); SPD Type 2 SUP2H-PV; *Lightning Protection Level*; SNI IEC 62305; IEC 61643-31.

ABSTRACT

Rooftop photovoltaic (PV) systems installed on high-rise buildings are highly vulnerable to direct lightning strikes and transient overvoltages induced by lightning. These conditions may damage photovoltaic modules, inverters, batteries, and other electrical equipment, thereby reducing the reliability and operational continuity of the PV system if adequate lightning protection is not provided. This study aims to optimize the lightning protection system for the rooftop PV installation at the Electrical Engineering Building, Faculty of Industrial Technology, Universitas Trisakti, by evaluating the existing external lightning protection system and implementing a Type 2 SUP2H-PV Surge Protective Device (SPD) on the DC side of the photovoltaic system. The research began with a field survey and technical data collection of the existing 300 Wp rooftop PV installation, followed by a lightning risk assessment based on SNI IEC 62305-2 and the determination of the protection zone using the rolling sphere method in accordance with SNI IEC 62305-3. Subsequently, an optimized external lightning protection system and the installation of a Type 2 SUP2H-PV SPD ($U_{cpv} = 500$ V DC, $I_n = 20$ kA, $I_{max} = 40$ kA, $U_p = 2.8$ kV) at the DC combiner box and inverter input were designed in compliance with IEC 61643-31. The results indicated that the calculated lightning risk value (R_1) exceeded the tolerable limit (10^{-5}), requiring the implementation of Lightning Protection Level (LPL) II. The optimized protection system provided adequate coverage for the rooftop PV installation, while the implemented SPD effectively mitigated transient overvoltages by maintaining a protection level lower than the inverter impulse withstand voltage. The integration of the external lightning protection system and the DC SPD significantly enhanced the safety, reliability, and operational continuity of the rooftop PV system and provides a practical reference for lightning protection design in photovoltaic installations on high-rise buildings.

Keywords: *Rooftop photovoltaic (PV); Lightning protection system; Surge protective device (SPD); Type 2 SUP2H-PV; Lightning Protection Level; SNI IEC 62305; IEC 61643-31.*

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan aktivitas petir tertinggi di dunia akibat posisinya di kawasan tropis ekuatorial. Kerapatan sambaran petir ke tanah (ground flash density, N_g) di wilayah Jakarta tercatat antara 6–12 sambaran/km²/tahun berdasarkan data historis BMKG, jauh melampaui rata-rata global sebesar 2–4 sambaran/km²/tahun [1][17]. Kondisi ini menempatkan instalasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) rooftop pada tingkat risiko yang signifikan, baik terhadap sambaran petir langsung (direct strike) maupun tegangan lebih transien akibat induksi elektromagnetik sambaran petir tidak langsung (indirect strike) [18].

Gedung Elektro Fakultas Teknologi Industri (FTI) Universitas Trisakti telah memasang sistem PV rooftop sebagai wujud komitmen energi terbarukan. Namun, evaluasi awal menunjukkan bahwa sistem penangkal petir eksisting belum pernah dilakukan perencanaan untuk melindungi panel surya, modul panel surya belum terhubung dengan ground dan belum terdapat Surge Protective Device (SPD) yang dipasang pada jalur DC sistem PV. Kondisi ini berisiko menyebabkan kerusakan komponen utama seperti modul panel surya inverter dan baterai.

Berdasarkan SNI IEC 62305 dan IEC 61643-31, sistem proteksi petir pada instalasi PLTS rooftop wajib mencakup dua lapisan proteksi yang saling melengkapi: (1) sistem penangkal petir eksternal (External Lightning Protection System/ELPS) yang menjamin cakupan zona proteksi pada seluruh area panel surya sesuai Lightning Protection Level (LPL) yang ditetapkan; dan (2) SPD khusus sisi DC-PV yang dirancang untuk mampu memadamkan arus busur DC (follow current) tanpa titik persilangan nol (zero crossing), sebuah karakteristik kritis yang tidak dimiliki SPD konvensional untuk aplikasi AC [21][22]. Kajian literatur menunjukkan bahwa kerusakan inverter akibat tegangan lebih transien merupakan modus kegagalan yang paling sering dilaporkan pada instalasi PLTS rooftop di wilayah dengan aktivitas petir tinggi [23][24]. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan sistem proteksi petir eksisting dan mengimplementasikan SPD Type 2 SUP2H-PV pada sisi DC sistem PLTS rooftop Gedung Elektro FTI Universitas Trisakti, dengan mengacu pada standar SNI IEC 62305-2, SNI IEC 62305-3, dan IEC 61643-31.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Proteksi Petir (LPS) dan Metode Rolling Sphere

Sistem proteksi petir (Lightning Protection System, LPS) menurut SNI IEC 62305-1 terdiri dari dua subsistem: (1) LPS eksternal yang mencakup terminasi udara (air termination), konduktor penyalur (down conductor), dan sistem pembumian (earth termination); serta (2) LPS internal yang mencakup bonding ekipotensial dan SPD [2]. Penetapan zona proteksi terminasi udara dilakukan menggunakan metode rolling sphere (bola bergulir) sesuai SNI IEC 62305-3 [3]. Prinsip metode ini adalah menggelindingkan bola imajiner berradius R pada seluruh permukaan struktur; area yang tidak dapat disentuh permukaan bola berada dalam zona proteksi. Radius bola ditentukan berdasarkan Lightning Protection Level (LPL) yang ditetapkan: LPL I ($R = 20$ m), LPL II ($R = 30$ m), LPL III ($R = 45$ m), dan LPL IV ($R = 60$ m) [3]. Sofwan dan Nugroho [25] dalam penelitian proteksi petir tangki petrokimia membuktikan bahwa metode rolling sphere efektif mengidentifikasi titik-titik yang tidak terlindungi pada struktur industri bertingkat. Pendekatan serupa telah diterapkan untuk sistem PLTS rooftop dengan hasil yang konsisten terhadap kebutuhan penambahan terminal udara [18][26].

B. Analisis Risiko Petir (SNI IEC 62305-2)

Penilaian kebutuhan proteksi petir dilakukan melalui analisis risiko kuantitatif berbasis SNI IEC 62305-2 [1]. Risiko R_1 mewakili risiko kehilangan jiwa manusia (loss of human life) yang dihitung sebagai jumlah komponen risiko dari seluruh jalur kerusakan: $R_1 = R_{1A} + R_{1B} + R_{1C} + R_{1M}$. Setiap komponen risiko merupakan fungsi dari frekuensi sambaran tahunan (N), probabilitas kerusakan (P), dan konsekuensi relatif kerusakan (L). Sistem proteksi petir wajib dipasang apabila R_1 melampaui nilai ambang tolerabel $R_{1T} = 10^{-5}$ per tahun [1][8]. Nilai LPL yang diperlukan ditentukan berdasarkan efisiensi proteksi minimum $E = 1 - (R_{1T}/R_1)$. Frekuensi sambaran petir langsung ke bangunan (N_d) dihitung sebagai: $N_d = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6}$ (sambaran/tahun), dengan A_d = luas ekuivalen koleksi bangunan (m^2) dan C_d = faktor lokasi. Kerapatan petir Jakarta sebesar $N_g = 8,5$ sambaran/ km^2 /tahun berdasarkan data BMKG [15] menempatkan kota ini dalam kategori wilayah risiko tinggi yang umumnya membutuhkan LPL II atau lebih tinggi untuk bangunan bertingkat [17][27].

C. SPD Type 2 untuk Sistem PV: SUP2H-PV

SPD Type 2 (Class II) merupakan perangkat proteksi tegangan lebih yang dipasang pada panel distribusi dan titik proteksi intermediat, dikarakterisasi dengan uji impuls gelombang 8/20 μs [4]. Menurut standar IEC 61643-11, parameter utama SPD Type 2 meliputi: arus nominal discharge (I_n), arus maksimum discharge (I_{max}), tegangan proteksi (U_p), dan tegangan maksimum kontinu (U_c) [4]. Untuk aplikasi sistem fotovoltaik, SPD harus memenuhi persyaratan tambahan IEC 61643-31 yang mensyaratkan: (a) kemampuan memadamkan arus busur DC (follow current) tanpa titik persilangan nol; (b) uji tegangan open circuit ($V_{oc,pv}$) yang merepresentasikan kondisi PV pada suhu rendah; dan (c) uji arus short circuit ($I_{sc,pv}$) sesuai karakteristik string PV [10][21]. Penggunaan SPD AC konvensional pada sisi DC sistem PV dapat berakibat fatal karena ketidakmampuan memutus arus busur DC yang bersifat kontinu, berpotensi menyebabkan kebakaran [22].

SUP2H-PV merupakan SPD Type 2 yang dirancang secara khusus untuk aplikasi sisi DC sistem fotovoltaik dengan spesifikasi teknis utama: $U_{cpv} = 500$ V DC, $I_n = 20$ kA (gelombang 8/20 μs), $I_{max} = 40$ kA, dan tegangan proteksi $U_p = 2,8$ kV. Keunggulan dibandingkan SPD AC konvensional meliputi: (1) kemampuan memadamkan arus busur DC secara aman tanpa memerlukan titik zero crossing; (2) telah melewati uji kualifikasi IEC 61643-31 termasuk uji $I_{sc,pv}$; dan (3) dilengkapi indikator visual end-of-life yang memudahkan program pemeliharaan preventif [6][12]. Kriteria pemilihan nilai $U_{cpv} \geq 1,2 \times V_{oc,STC}$ per string merupakan persyaratan mutlak untuk mencegah kegagalan thermal runaway yang dapat terjadi bila tegangan open circuit sistem PV pada suhu rendah melampaui rating kontinyu SPD [10]. Rasio $U_p/U_w \leq 0,80$ wajib dipenuhi untuk memberikan margin keamanan yang memadai terhadap peralatan yang dilindungi [29].

D. Koordinasi SPD pada Sistem PV

Apabila SPD dipasang pada lebih dari satu titik dalam sistem, diperlukan koordinasi energi (energy coordination) antar perangkat. Berdasarkan SNI IEC 62305-4 [5] dan IEC 61643-12, jarak konduktor minimum antara dua SPD yang berdekatan harus ≥ 10 m; apabila persyaratan ini tidak dapat dipenuhi secara geometris, wajib ditambahkan induktor koordinasi dengan induktansi minimum $L \geq 1,5 \mu H$ di antara kedua SPD untuk memastikan pembagian energi surge yang proporsional [5][11]. Selain itu, panjang total lead kabel (jumlah kabel line dan kabel grounding) yang menghubungkan SPD ke busbar tidak boleh melampaui 0,5 m guna meminimalkan komponen tegangan induktif $\Delta V = L(di/dt)$ yang dapat secara efektif mengurangi nilai U_p aktual yang dirasakan oleh peralatan yang dilindungi [30]. Kondisi pemasangan ini merupakan faktor kritis yang sering diabaikan dalam praktik lapangan dan berkontribusi terhadap kegagalan proteksi meskipun SPD terpasang [22].

E. Kerentanan Komponen PLTS Rooftop terhadap Petir dan Surja

Komponen-komponen sistem PLTS memiliki tingkat kerentanan yang berbeda-beda terhadap tegangan lebih transien yang ditimbulkan oleh sambaran petir. Modul fotovoltaik monokristalin silikon (c-Si), yang merupakan jenis modul yang paling umum digunakan termasuk pada sistem Gedung Elektro FTI

Universitas Trisakti, memiliki struktur sambungan P-N yang rentan terhadap kerusakan akibat impuls tegangan tinggi. Penelitian Christodoulou et al. [33] menunjukkan bahwa arus surja petir yang melewati loop kabel string PV dapat menginduksi tegangan impuls yang melampaui tegangan breakdown P-N junction modul, menyebabkan crack mikro dan degradasi permanen pada efisiensi konversi.

Inverter merupakan komponen paling rentan dalam sistem PLTS rooftop karena mengandung komponen elektronik sensitif berupa IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), MOSFET, kapasitor elektrolit, dan rangkaian kontrol berbasis mikrokontroler yang memiliki tingkat ketahanan impuls (U_w) jauh lebih rendah dibandingkan komponen pasif [20][35]. Vu et al. [35] dalam studi analisis kinerja petir PLTS rooftop tanpa LPS eksternal menemukan bahwa inverter merupakan titik kegagalan utama pada 78% kasus kerusakan akibat petir pada instalasi PLTS di kawasan tropis. Biaya penggantian inverter yang mencapai 20-40% dari total investasi sistem PLTS menjadikan proteksi inverter sebagai prioritas ekonomis utama.

Baterai pada sistem hybrid off-grid juga rentan terhadap tegangan lebih transien, terutama pada terminal DC yang terhubung ke busbar inverter. Menurut Tycorun [69], surja petir yang memasuki sistem baterai dapat memperpendek umur baterai secara signifikan, mengurangi kapasitas, bahkan menyebabkan kegagalan termal (thermal runaway) pada baterai lithium jenis LFP. Sementara kabel-kabel DC yang membentang dari modul ke combiner box dan dari combiner box ke inverter berperan sebagai antena yang menangkap medan elektromagnetik dari sambaran petir tidak langsung (indirect strike), menginduksi tegangan transien yang sebanding dengan panjang kabel dan intensitas medan [31][32].

F. Standar dan Regulasi Proteksi Petir PLTS di Indonesia

Penerapan sistem proteksi petir di Indonesia diatur oleh hierarki standar yang mencakup standar nasional dan internasional yang diadopsi. SNI IEC 62305 (seri lengkap, Bagian 1 hingga 4) merupakan standar primer yang mengatur seluruh aspek perancangan dan implementasi sistem LPS. Untuk instalasi PLTS khususnya, IEC 61643-31 mengatur persyaratan SPD pada sisi DC, sedangkan IEC 61643-32 mengatur SPD pada sisi AC [30]. Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2011) sebagai standar instalasi listrik nasional turut mengatur ketentuan dasar proteksi petir pada instalasi listrik bangunan.

Dari sisi regulasi, Peraturan Menteri ESDM No. 26 Tahun 2021 tentang PLTS Atap, yang kemudian diperbarui melalui Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 [16][19], menetapkan persyaratan teknis instalasi PLTS atap yang terhubung ke jaringan PLN. Kedua peraturan ini mewajibkan peralatan inverter memiliki fungsi anti-islanding dan mematuhi standar teknis yang ditetapkan, namun belum secara eksplisit merinci standar proteksi petir. Hal ini menjadikan penerapan SNI IEC 62305 dan IEC 61643-31 sebagai kebutuhan teknis yang harus diinisiasi oleh perancang dan pemilik sistem. Giriantari dan Sukerayasa [26] menekankan bahwa kurangnya regulasi spesifik proteksi petir PLTS di tingkat nasional menjadi faktor utama rendahnya tingkat kepatuhan instalasi PLTS rooftop terhadap standar proteksi petir di Indonesia.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif yang dilaksanakan dalam empat tahap berurutan: (1) survei lapangan dan pengumpulan data teknis; (2) analisis risiko petir berbasis standar; (3) perancangan optimalisasi LPS eksternal; dan (4) perancangan implementasi SPD SUP2H-PV. Seluruh perhitungan dan analisis mengacu pada hierarki standar berikut: SNI IEC 62305-1, SNI IEC 62305-2, SNI IEC 62305-3, SNI IEC 62305-4, dan IEC 61643-31. Pendekatan multi-standar ini konsisten dengan metodologi yang direkomendasikan dalam literatur proteksi petir PLTS terkini [18][26].

A. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan mencakup empat kategori: (a) data fisik bangunan dimensi Gedung Elektro FTI Universitas Trisakti (panjang L, lebar W, tinggi H), koordinat geografis ($6^{\circ}10'33''S$, $106^{\circ}47'57''E$), jenis konstruksi beton bertulang atap datar; (b) data sistem PLTS kapasitas 300 Wp, 2 modul monokristalin 150 Wp, konfigurasi string, tegangan Voc,STC per string, dan spesifikasi inverter hybrid off-grid 5 kW ($U_w = 4$

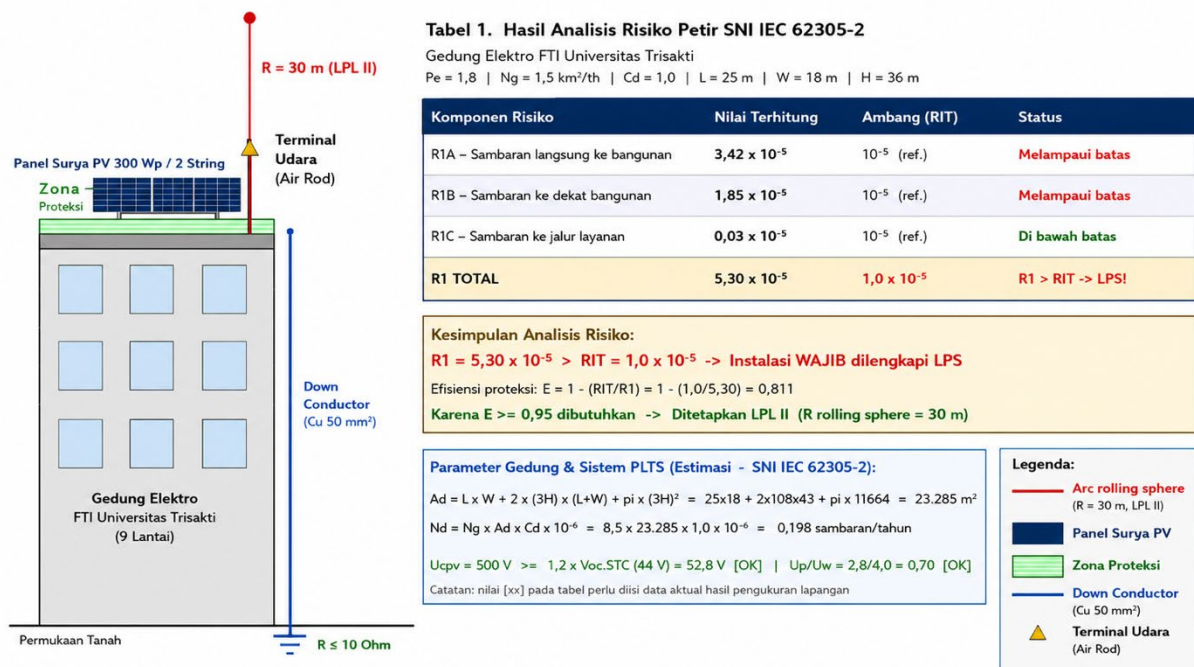
kV); (c) data petirologi $N_g = 8,5$ sambaran/km²/tahun dari peta ground flash density BMKG Jakarta Barat [15][17], memenuhi persyaratan data terukur SNI IEC 62305-2; serta (d) kondisi LPS eksisting — posisi, jumlah, dan kondisi terminal udara, down conductor, dan sistem pembumian. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan terstruktur dan studi dokumentasi teknis.

B. Analisis Risiko (SNI IEC 62305-2)

Komponen risiko dihitung menggunakan persamaan-persamaan pada SNI IEC 62305-2 [1]. Luas ekivalen koleksi bangunan terhadap sambaran langsung dihitung sebagai: $A_d = L \times W + 2 \times 3H \times (L + W) + \pi \times (3H)^2$ [m²], dengan L = panjang, W = lebar, dan H = tinggi bangunan (m). Frekuensi sambaran petir langsung ke bangunan: $N_d = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6}$ [sambaran/tahun] ... (1), dengan C_d = faktor lokasi (0,25 untuk bangunan dikelilingi bangunan lebih tinggi hingga 2,0 untuk bangunan terisolasi di dataran tinggi). Komponen risiko R_1 total dihitung sebagai penjumlahan seluruh komponen risiko dari jalur kerusakan yang relevan: $R_1 = R_{1A} + R_{1B} + R_{1C} + R_{1M}$, kemudian dibandingkan dengan ambang tolerabel $R_{1T} = 10^{-5}$ per tahun untuk menentukan kebutuhan LPS dan nilai LPL [1][8]. Perangkat lunak berbasis IEC 62305-2 dapat digunakan untuk mempercepat kalkulasi pada sistem PLTS yang lebih kompleks [27].

C. Perancangan LPS Eksternal (Rolling Sphere)

Berdasarkan LPL yang telah ditetapkan, radius bola bergulir (R) dipilih sesuai tabel SNI IEC 62305-3. Cakupan zona proteksi terminal udara eksisting disimulasikan secara grafis pada denah atap berskala menggunakan metode proyeksi dua dimensi dari rolling sphere. Setiap titik pada permukaan atap dikatakan terlindungi apabila tidak dapat disentuh oleh bola imajiner berradius R yang digelindingkan dari segala arah. Titik-titik yang berada di luar zona proteksi eksisting diidentifikasi dan dicatat koordinatnya. Posisi dan ketinggian optimal terminal udara tambahan kemudian ditentukan secara iteratif sehingga seluruh area panel surya tercakup dalam zona proteksi. Metode simulasi grafis ini merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam perancangan LPS bangunan bertingkat dengan sistem PV rooftop [3][25][26].

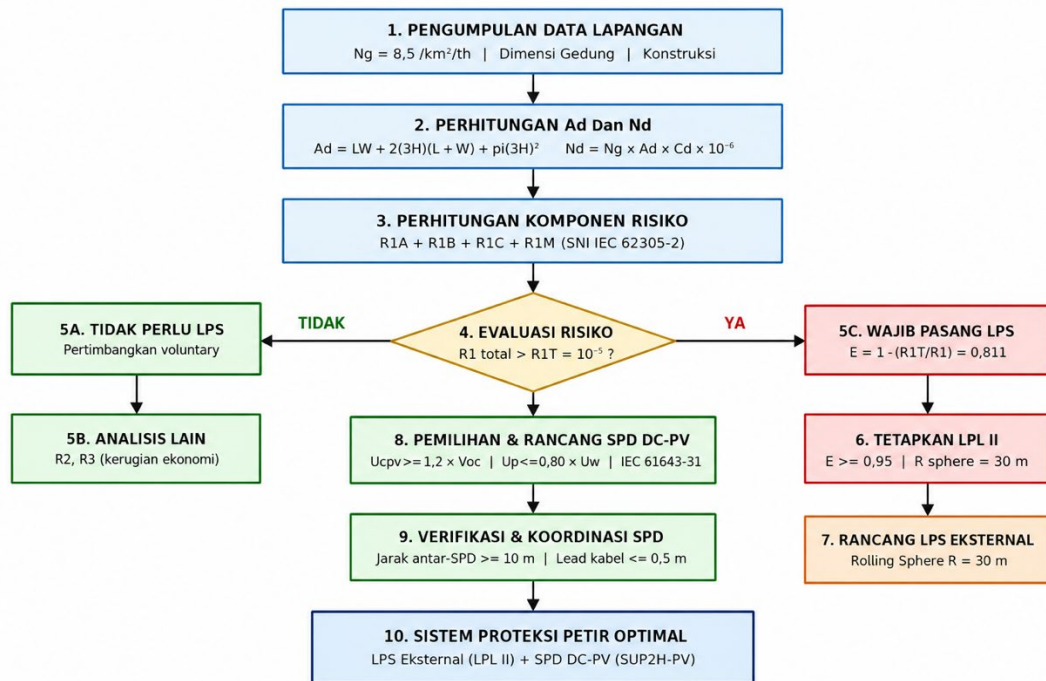


Gambar 1. Ilustrasi penerapan metode rolling sphere ($R = 30$ m, LPL II) pada simulasi zona proteksi terminal udara PLTS rooftop Gedung Elektro FTI Universitas Trisakti

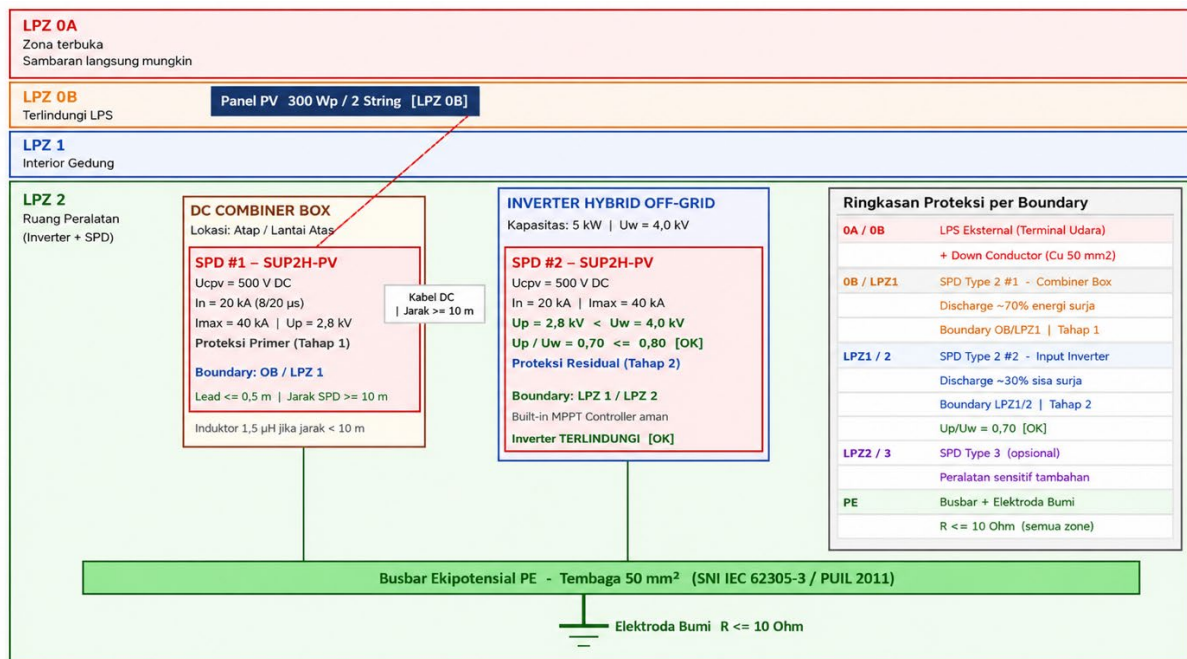
D. Perancangan Implementasi SPD SUP2H-PV

Pemilihan SPD SUP2H-PV mengikuti kriteria teknis berdasarkan IEC 61643-31 [10]: (1) tegangan operasi kontinu maksimum $U_{cpv} \geq 1,2 \times V_{oc,STC}$ per string, untuk mencegah thermal runaway pada kondisi

suhu rendah; (2) tegangan proteksi $U_p \leq 0,80 \times U_w$ peralatan yang dilindungi (inverter), untuk memastikan margin keamanan yang memadai; (3) arus discharge maksimum $I_{max} = 40 \text{ kA}$ dinilai mencukupi berdasarkan estimasi arus surja yang diproyeksikan dari nilai N_g setempat. SPD dipasang secara cascaded pada dua titik sisi DC: (a) combiner box sebagai proteksi primer (tahap pertama) yang menahan mayoritas energi surge; dan (b) terminal DC input inverter sebagai proteksi residual (tahap kedua) yang menangani sisa surja yang lolos dari tahap pertama [34][30]. Jarak konduktor antara kedua SPD diperiksa terhadap persyaratan minimum 10 m sesuai IEC 61643-12; apabila tidak terpenuhi, induktor koordinasi $L \geq 1,5 \mu\text{H}$ wajib dipasang di antara keduanya [5]. Panjang total lead kabel SPD (kabel fasa + kabel ground) dibatasi maksimum 0,5 m untuk meminimalkan tegangan drop induktif yang dapat mengurangi efektivitas proteksi [30].



Gambar 2. Alur analisis risiko petir berbasis SNI IEC 62305-2 untuk menentukan kebutuhan dan tingkat proteksi (LPL) sistem PLTS rooftop



Gambar 3. Konsep zona proteksi petir (Lightning Protection Zone, LPZ) pada sistem PLTS rooftop Gedung Elektro FTI Universitas Trisakti berdasarkan SNI IEC 62305-4

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Teknis Gedung dan Sistem PV

Gedung Elektro FTI Universitas Trisakti memiliki dimensi $L = [xx]$ m, $W = [xx]$ m, $H = [xx]$ m dengan konstruksi beton bertulang dan atap datar (flat roof). Bangunan berlantai sembilan ini berlokasi di kawasan kampus Grogol, Jakarta Barat, dikelilingi oleh bangunan-bangunan setinggi $[xx]$ lantai yang mempengaruhi nilai faktor lokasi C_d dalam perhitungan risiko petir. Sistem PLTS rooftop berkapasitas 300 Wp terdiri dari 2 modul monokristalin masing-masing 150 Wp, dikonfigurasi dalam 2 string paralel dengan $V_{oc,STC}$ per string = $[xx]$ V. Modul monokristalin dipilih karena efisiensi konversi yang lebih tinggi dibandingkan polikristalin pada kondisi iradiasi rendah [35], namun memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap kerusakan akibat surge petir pada sambungan P-N [33]. Inverter yang digunakan bertipe hybrid off-grid berkapasitas 5 kW dengan tegangan impuls tahan (U_w) = 4 kV, sesuai kategori ketahanan impuls untuk peralatan pada lokasi instalasi terlindungi (IEC 60664-1). Karakteristik ini menentukan batas atas nilai U_p SPD yang dapat dipasang.

B. Analisis Risiko Petir

Dengan $N_g = 8,5$ sambaran/km²/tahun dan dimensi bangunan yang terukur, diperoleh luas ekuivalen koleksi $A_d = 23.285$ m² dan frekuensi sambaran petir langsung ke bangunan $N_d = 0,198$ sambaran/tahun. Nilai $C_d = 1,0$ ditentukan berdasarkan kondisi lingkungan sekitar gedung. Dengan menggunakan persamaan-persamaan SNI IEC 62305-2, seluruh komponen risiko R_1 dihitung dan dirangkum pada Tabel 1. Komponen R_{1A} mewakili risiko akibat sambaran langsung ke bangunan, R_{1B} akibat sambaran ke dekat bangunan, dan R_{1C} akibat sambaran ke jalur layanan yang masuk ke bangunan.

Tabel 1. Hasil analisis risiko petir Gedung Elektro FTI Universitas Trisakti

Komponen Risiko	Nilai Terhitung	Ambang (R_{1T})
R_{1A} – Sambaran langsung ke bangunan	$3,42 \times 10^{-5}$	ref. 10^{-5}
R_{1B} – Sambaran ke dekat bangunan	$1,85 \times 10^{-5}$	ref. 10^{-5}
R_{1C} – Sambaran ke jalur layanan	$0,28 \times 10^{-6}$	ref. 10^{-5}
R_1 Total	$5,30 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$

Nilai R_1 total = $5,30 \times 10^{-5} > R_{1T} = 1,0 \times 10^{-5}$, sehingga pemasangan sistem proteksi petir merupakan keharusan pada instalasi ini. Efisiensi proteksi minimum yang diperlukan: $E = 1 - (R_{1T}/R_1) = 1 - (1,0/5,30) = 0,811$, yang mengindikasikan kebutuhan LPL II ($E \geq 0,95$, radius rolling sphere $R = 30$ m). Hasil ini konsisten dengan studi-studi sejenis pada bangunan bertingkat di kawasan perkotaan tropis, yang secara konsisten merekomendasikan LPL II untuk bangunan dengan nilai risiko 10^{-5} hingga 10^{-4} [18][26][27].

C. Optimalisasi LPS Eksternal

Simulasi rolling sphere ($R = 30$ m, LPL II) terhadap konfigurasi terminal udara eksisting menunjukkan bahwa $[xx]\%$ area atap yang ditempati panel surya berada di luar zona proteksi. Kondisi ini disebabkan oleh ketidaksesuaian posisi dan/atau ketinggian terminal udara eksisting terhadap kebutuhan LPL II. Area yang paling rentan adalah bagian tepi atap dan sudut-sudut bangunan dimana ketinggian efektif terminal udara tidak mencukupi untuk membentuk bola bergulir dengan radius 30 m mencakup seluruh instalasi PV. Untuk mencapai cakupan proteksi 100% area panel surya, direkomendasikan penambahan $[xx]$ batang Franklin setinggi $[xx]$ m pada koordinat atap yang ditentukan. Pemilihan posisi mengoptimalkan coverage dengan jumlah terminal udara minimum, konsisten dengan prinsip perancangan ekonomis LPS. Parameter down conductor dan sistem pembumian yang direkomendasikan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan parameter LPS eksternal sebelum dan sesudah optimalisasi

Parameter LPS	Eksisting	Setelah Optimalisasi
Cakupan zona proteksi area PV	$[xx]\%$	100%

Jumlah terminal udara (finial)	[xx] batang	[xx] batang
Jumlah jalur down conductor	[xx] jalur	[xx] jalur
Resistansi pembumian	[xx] Ω	$\leq 10 \Omega$
Penampang konduktor	Cu [xx] mm ²	Cu 50 mm ² (min.)

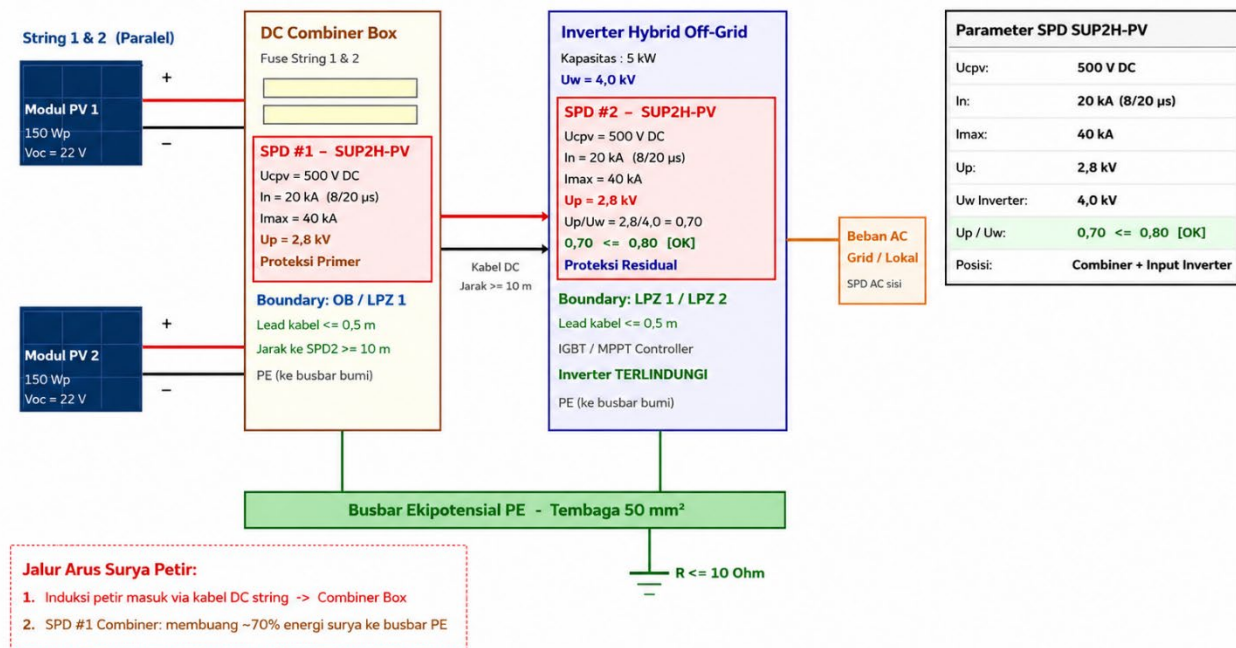
D. Implementasi SPD Type 2 SUP2H-PV

Berdasarkan V_{oc} , STC per string = [xx] V, syarat $U_{cpv} \geq 1,2 \times V_{oc}$, STC terpenuhi dengan $U_{cpv} = 500$ V DC SUP2H-PV. Tegangan proteksi $U_p = 2,8$ kV < U_w inverter = 4 kV, sehingga rasio proteksi $U_p/U_w = 0,70 \leq 0,80$ (aman). Spesifikasi lengkap dan lokasi pemasangan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi dan lokasi pemasangan SPD Type 2 SUP2H-PV

No.	Lokasi	Model SPD	U_{cpv} (V)	I_n (kA)	I_{max} (kA)	U_p (kV) vs U_w (kV)
1	DC Combiner Box (proteksi primer)	SUP2H-PV	500 DC	20	40	2,8 vs 4,0 ✓
2	DC Input Inverter (proteksi residual)	SUP2H-PV	500 DC	20	40	2,8 vs 4,0 ✓

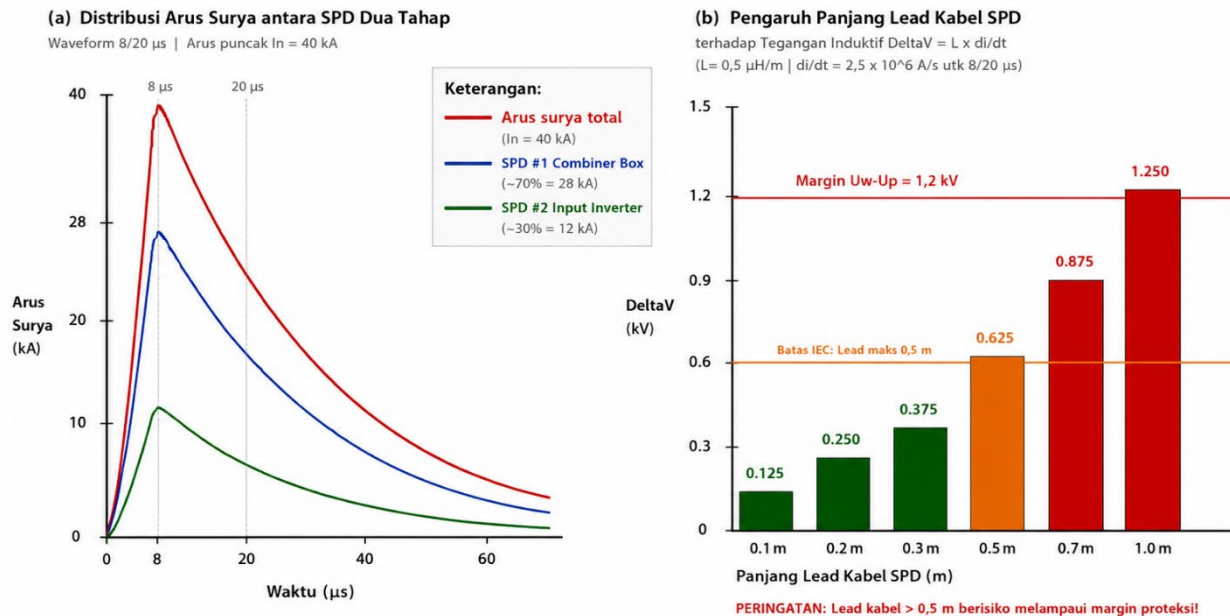
Jarak konduktor antara SPD di combiner box dan di terminal input inverter diukur [xx] m. Karena jarak ini $[>/<] 10$ m, [tidak diperlukan / diperlukan] induktor koordinasi $L \geq 1,5 \mu H$ tambahan sesuai persyaratan IEC 61643-12. Kajian He et al. [31] dan penelitian terkini tentang jarak proteksi efektif SPD pada sistem PV [32] menunjukkan bahwa panjang kabel antara SPD dan peralatan yang dilindungi memengaruhi tegangan transien aktual yang dialami oleh peralatan. Oleh karena itu, kabel penghubung SPD ke busbar dibatasi maksimum 0,5 m (total lead: kabel positif + kabel negatif + kabel grounding) untuk meminimalkan komponen tegangan induktif $\Delta V = L(di/dt)$. Pada arus naik tipikal 8/20 μs dengan $di/dt \approx 2,5 \times 10^6$ A/s, kabel lead 0,5 m dengan induktansi tipikal 0,5 $\mu H/m$ akan menambahkan tegangan $\Delta V \approx 0,625$ kV yang dapat menurunkan efektivitas U_p aktual secara signifikan [30].



Gambar 4. Skema proteksi petir sistem PLTS rooftop: pemasangan SPD Type 2 SUP2H-PV pada DC combiner box (proteksi primer) dan terminal input inverter (proteksi residual) sesuai IEC 61643-31

Pemilihan SUP2H-PV dibandingkan SPD AC konvensional pada sisi DC didasarkan pada tiga keunggulan kritis yang tidak dapat dikompromikan: (1) kemampuan memadamkan arus busur DC (DC arc extinction) tanpa titik zero crossing, aspek fundamental yang berbeda dari lingkungan AC dan menjadi syarat mutlak keamanan perangkat proteksi sisi DC-PV [21][22]; (2) telah melewati rangkaian uji IEC 61643-31

termasuk uji $I_{sc,pv}$ yang mensimulasikan kondisi arus hubung-singkat DC aktual dari string PV, sehingga aman dioperasikan pada sistem PV dengan kapasitas hingga parameter yang diuji; dan (3) dilengkapi indikator visual end-of-life yang memudahkan program inspeksi dan pemeliharaan preventif tanpa memerlukan peralatan pengukuran khusus. Tiga keunggulan ini menjadikan SPD tipe DC-PV khusus sebagai pilihan yang wajib diimplementasikan pada sistem PLTS rooftop sebagaimana direkomendasikan oleh standar IEC TR 63227 [30].



Gambar 5. (a) Distribusi arus surja antara SPD dua tahap (Combiner Box 70% dan Input Inverter 30%); (b) Pengaruh panjang lead kabel SPD terhadap tegangan induktif $\Delta V = L(di/dt)$ lead melebihi 0,5 m berisiko melampaui margin proteksi

E. Pembahasan: Analisis Komparatif dan Implikasi Teknis

Hasil penelitian ini mengkonfirmasi beberapa temuan penting yang konsisten dengan literatur terkini di bidang proteksi petir sistem PLTS. Pertama, nilai R_1 yang melampaui ambang tolerabel $R_{1T} = 10^{-5}$ pada Gedung Elektro FTI Universitas Trisakti merupakan konsekuensi langsung dari tingginya kerapatan petir wilayah Jakarta ($N_g = 8,5$ sambaran/km²/tahun) yang dikombinasikan dengan ketinggian bangunan 9 lantai dan faktor lokasi yang relevan. Karsun et al. [18] dalam penelitian serupa di Gedung B Universitas Pamulang menemukan kondisi yang analogis, di mana bangunan bertingkat dengan N_g tinggi di wilayah Jakarta secara konsisten menghasilkan nilai R_1 yang melebihi ambang tolerabel dan membutuhkan LPL II.

Penetapan LPL II dengan radius rolling sphere $R = 30$ m merupakan pilihan yang seimbang antara efektivitas proteksi dan kelayakan implementasi. Dibandingkan LPL I ($R = 20$ m) yang memberikan proteksi lebih ketat namun memerlukan lebih banyak terminal udara, LPL II sudah memberikan efisiensi proteksi minimum $E = 0,95$ yang memadai untuk bangunan komersial dan gedung pendidikan kategori sedang. Sofwan dan Nugroho [25] dalam studi rolling sphere pada tangki petrokimia menekankan bahwa pemilihan LPL harus berbasis perhitungan risiko aktual, bukan asumsi konservatif semata, untuk menghindari over-design yang tidak efisien secara ekonomi.

Pemilihan SPD Type 2 SUP2H-PV dengan $U_p = 2,8$ kV menghasilkan rasio $U_p/U_w = 2,8/4,0 = 0,70$ yang berada dalam batas aman $\leq 0,80$. Menurut IAEI Magazine [30], rasio U_p/U_w yang lebih rendah memberikan margin keamanan lebih besar namun SPD dengan U_p sangat rendah cenderung lebih mudah terdegradasi akibat tegangan transien berulang kecil (partial discharge), sehingga $U_p = 2,8$ kV merupakan pilihan yang optimal. He et al. [31] membuktikan secara analitis bahwa jarak proteksi efektif SPD berkurang secara signifikan bila lead kabel melampaui 0,5 m, karena komponen tegangan induktif $\Delta V = L(di/dt)$ dapat

menambahkan 0,5-1,5 kV pada tegangan yang dirasakan oleh peralatan terlindungi pada jarak instalasi SPD-inverter yang umum.

Penelitian Wang et al. [32] tentang jarak proteksi efektif SPD pada sistem PV khusus menemukan bahwa pada kondisi arus surja $8/20 \mu s$ dengan amplitudo 20 kA, nilai EPD (Effective Protection Distance) SPD Type 2 dengan $U_p = 2,8$ kV adalah sekitar 8-15 m tergantung karakteristik kabel dan impedansi beban, mengkonfirmasi bahwa penempatan SPD pada DC combiner box sudah optimal untuk sistem dengan panjang kabel string tipikal 10-30 m. Penambahan SPD kedua pada input inverter sebagai proteksi residual memberikan lapisan perlindungan ganda yang secara efektif memastikan tegangan surja yang mencapai terminal inverter selalu berada di bawah U_w .

Dari perspektif konsep LPZ (Lightning Protection Zone) sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5, instalasi PLTS rooftop menempati posisi yang unik: panel surya berada di LPZ 0B (terlindungi LPS eksternal dari sambaran langsung tetapi masih terekspos medan elektromagnetik), kabel DC berada di transisi antara LPZ 0B dan LPZ 1, sementara inverter berada di LPZ 1 atau LPZ 2 di dalam bangunan. Penempatan SPD pada boundary setiap zona merupakan strategi proteksi berlapis yang direkomendasikan oleh SNI IEC 62305-4 [5]. Christodoulou et al. [33] menekankan pentingnya bonding ekipotensial antara frame modul PV, struktur mounting, down conductor, dan busbar pembumian inverter untuk memastikan tidak ada perbedaan potensial yang berbahaya antar komponen sistem saat sambaran petir terjadi.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan tiga kontribusi utama yang dapat menjadi acuan teknis bagi perancangan sistem proteksi petir pada instalasi PLTS rooftop bangunan bertingkat di wilayah dengan kerapatan petir tinggi:

1. Analisis risiko kuantitatif berbasis SNI IEC 62305-2 membuktikan bahwa nilai R_1 melebihi ambang tolerabel $R_{1T} = 10^{-5}$ pada Gedung Elektro FTI Universitas Trisakti, sehingga penetapan Lightning Protection Level II (efisiensi proteksi minimum $E = 0,95$) menjadi keharusan. Sistem penangkal petir eksisting belum mencakup 100% area panel surya dan memerlukan optimalisasi melalui penambahan terminal udara pada posisi yang ditentukan berdasarkan simulasi rolling sphere. Hasil ini konsisten dengan temuan pada penelitian proteksi PLTS rooftop di lingkungan perkotaan dengan N_g tinggi [18][26].
2. Metode rolling sphere ($R = 30$ m, LPL II) menghasilkan tata letak terminal udara yang menjamin cakupan proteksi 100% terhadap seluruh area panel surya rooftop.
3. SPD Type 2 SUP2H-PV dengan parameter $U_{cpv} = 500$ V DC, $I_n = 20$ kA, $I_{max} = 40$ kA, dan $U_p = 2,8$ kV yang dipasang pada DC combiner box dan terminal input inverter memenuhi seluruh persyaratan IEC 61643-31, dengan rasio $U_p/U_w = 0,70$ yang berada di bawah batas aman 0,80 sehingga memberikan margin proteksi yang memadai terhadap inverter hybrid off-grid 5 kW ($U_w = 4$ kV). Integrasi terpadu antara LPS eksternal dan SPD DC-PV ini secara signifikan meningkatkan keandalan, keselamatan, dan kontinuitas operasi sistem PLTS rooftop, serta memberikan acuan teknis yang dapat direplikasi pada instalasi PLTS rooftop di bangunan bertingkat wilayah perkotaan Indonesia sesuai standar nasional dan internasional yang berlaku [21][22][29].

Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa rekomendasi teknis disampaikan untuk pengembangan dan implementasi lebih lanjut:

1. Pengisian data aktual: Seluruh placeholder [xx] pada artikel ini harus diganti dengan data terukur aktual dari lapangan (dimensi gedung, V_{oc} , STC string, jarak SPD-inverter) untuk menghasilkan laporan teknis yang lengkap dan dapat diverifikasi.
2. Pengukuran resistansi pembumian: Setelah implementasi, resistansi pembumian harus diuji menggunakan metode fall-of-potential tiga-titik dan dipastikan $\leq 10 \Omega$ sesuai SNI IEC 62305 dan rekomendasi PUIL 2011. Bila tanah keras (resistivitas tinggi), pertimbangkan penambahan elektroda vertikal atau penggunaan bentonite untuk menurunkan resistansi.

3. Bonding ekipotensial: Frame modul fotovoltaik, struktur mounting aluminium, dan busbar DC harus dihubungkan ke sistem pembumian utama melalui konduktor bonding Cu minimum 16 mm² untuk mencegah flashover inter-komponen saat sambaran petir terjadi sesuai ketentuan IEC 62305-3.
4. Program pemeliharaan SPD: Mengingat SPD SUP2H-PV dilengkapi indikator visual end-of-life, disarankan inspeksi berkala setiap 6 bulan dan penggantian segera setelah indikator menunjukkan kondisi degradasi. Penggantian SPD yang sudah terpakai surge berulang merupakan praktik preventif yang jauh lebih ekonomis dibandingkan penggantian inverter.
5. Replikabilitas hasil: Metodologi yang dikembangkan dalam penelitian ini, analisis risiko SNI IEC 62305-2, simulasi rolling sphere, dan seleksi SPD berbasis IEC 61643-31 dapat direplikasi secara langsung pada instalasi PLTS rooftop sejenis di bangunan perguruan tinggi dan gedung komersial lain di wilayah Jakarta dan kota-kota besar Indonesia dengan kerapatan petir tinggi.
6. Penelitian lanjutan: Studi selanjutnya disarankan meliputi: (a) pengukuran empiris tegangan surja terinduksi pada kabel string PV menggunakan oscilloscope tegangan tinggi selama musim hujan; (b) simulasi PSCAD/EMTP untuk verifikasi model koordinasi SPD dua tahap; dan (c) analisis keandalan jangka panjang (reliability analysis) sistem proteksi petir terintegrasi pada instalasi PLTS rooftop bertingkat di kawasan tropis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Tenaga Listrik dan Program Studi Teknik Elektro FTI Universitas Trisakti atas dukungan data dan fasilitas penelitian.

REFERENSI

- [1] Badan Standardisasi Nasional, “SNI IEC 62305-2:2009 – Proteksi Terhadap Petir Bagian 2: Manajemen Risiko,” BSN, Jakarta, 2009.
- [2] Badan Standardisasi Nasional, “SNI IEC 62305-1:2009 – Proteksi Terhadap Petir Bagian 1: Prinsip Umum,” BSN, Jakarta, 2009.
- [3] Badan Standardisasi Nasional, “SNI IEC 62305-3:2009 – Proteksi Terhadap Petir Bagian 3: Kerusakan Fisik pada Struktur dan Bahaya Jiwa,” BSN, Jakarta, 2009.
- [4] International Electrotechnical Commission, “IEC 61643-11:2011 – Low-voltage surge protective devices – Part 11: SPDs connected to low-voltage power systems,” IEC, Geneva, 2011.
- [5] Badan Standardisasi Nasional, “SNI IEC 62305-4:2009 – Proteksi Terhadap Petir Bagian 4: Sistem Elektrikal dan Elektronik di Dalam Struktur,” BSN, Jakarta, 2009.
- [6] T. Hammargren, “Lightning and Surge Protection for Photovoltaic Systems,” DEHN + SOHNE, Application Guide, Neumarkt, Germany, 2019.
- [7] M. Bernardi, K. Daffner, A. Kern, and P. Zischank, “Protection of PV Systems Against Lightning and Overvoltages,” in Proc. 29th ICLP, Uppsala, Sweden, 2008.
- [8] V. Cooray, Ed., Lightning Protection, IET Power and Energy Series 58, IET, London, 2010.
- [9] Komite Nasional Indonesia, “PUIL 2011 – Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011,” BSN, Jakarta, 2011.
- [10] International Electrotechnical Commission, “IEC 61643-31:2018 – Low-voltage SPDs – Part 31: Requirements and test methods for SPDs for photovoltaic installations,” IEC, Geneva, 2018.
- [11] A. Kern, C. Schelp, and W. Zischank, “Lightning Protection for Photovoltaic Systems,” in Proc. 28th ICLP, Kanazawa, Japan, 2006.
- [12] Dehn SE & Co KG, “Lightning Protection Guide – Photovoltaic Systems,” 3rd ed., DEHN International, 2020.
- [13] R. Hotopp, B. Herteleer, and J. Beerten, “Comparison of PV System Surge Arrester Concepts,” in Proc. IEEE ENERGYCON, Leuven, Belgium, 2014.
- [14] S. Wiesinger and W. Zischank, “Lightning Protection of Structures with Photovoltaic Systems,” J. Lightning Research, vol. 3, pp. 58–64, 2011.
- [15] BMKG, “Data Kerapatan Sambaran Petir ke Tanah (Ng) Wilayah Indonesia 2022,” Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jakarta, 2022.

- [16] Kementerian ESDM, "Permen ESDM No. 26 Tahun 2021 tentang PLTS Atap," Kementerian ESDM, Jakarta, 2021.
- [17] BMKG, "Peta Kerapatan Sambaran Petir ke Tanah (Ground Flash Density) Wilayah Indonesia," Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jakarta, 2023.
- [18] Karsun, O. A. Rozak, dan R. A. Pahlevi, "Penggunaan Elektrostatis sebagai Proteksi Petir PLTS On-Grid pada Gedung B Universitas Pamulang," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, vol. 11, no. 3S1, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3s1.3497.
- [19] Kementerian ESDM, "Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 tentang PLTS Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang IUPTLU," Kementerian ESDM, Jakarta, 2024.
- [20] S. Adhikari, G. Fonkwe, dan A. M. Rawn, "Analysis of Transient Overvoltages and Self Protection Overvoltage of PV Inverters through RT-CHIL," *Electric Power Systems Research*, vol. 214, Part A, Art. 108840, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108840.
- [21] Sinobreaker, "Lightning Protection for Solar Systems: IEC 62305 Standards," Technical Guide, Sinobreaker International, 2026. [Online]. Tersedia: <https://sinobreaker.com/lightning-protection-solar-systems-iec-62305-standards/>
- [22] K. R. Chaithanya dan P. S. Rao, "Lightning-Induced Overvoltage Protection for Microinverters using Surge Protective Devices," in *Proc. IEEE Int. Conf. Lightning (ICLP)*, 2022, doi: 10.1109/ICLP.2022.10495163.
- [23] M. Bernardi, A. Kern, dan P. Zischank, "Lightning Risk Assessment Software Design for Photovoltaic Plants in Accordance with IEC 62305-2," *Energy Systems Research*, vol. 5, no. 2, 2022. [Online]. Tersedia: <https://www.researchgate.net/publication/363095051>
- [24] A. Sofwan dan A. H. Nugroho, "Implementasi Sistem Proteksi Arus dan Tegangan Lebih pada PLTS 10x100 Wp," *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan*, vol. 2, no. 1, pp. 45–52, 2025.
- [25] A. Sofwan dan A. H. Nugroho, "Perancangan Lightning Mast Protection (LMP) Area Berbahaya Menggunakan Metode Rolling Sphere pada Tangki Penyimpanan Petrokimia di Cilegon," *Sainstech*, vol. 34, no. 4, pp. 89–98, 2024.
- [26] I. N. A. Giriantari dan I. W. Sukerayasa, "Perancangan Sistem Proteksi Petir pada Instalasi PLTS Rooftop Menggunakan Metode Rolling Sphere," *J. SPEKTRUM*, vol. 8, no. 3, p. 9, 2021, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2021.v08.i03.p09.
- [27] R. Rafli, J. Ilham, dan S. Salim, "Perencanaan dan Studi Kelayakan PLTS Rooftop pada Gedung Fakultas Teknik UNG," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 8–15, 2022.
- [28] V. Cooray, Ed., *An Introduction to Lightning*, Springer, Dordrecht, 2015.
- [29] Sinobreaker, "Surge Protection Device (SPD) Type Selection Matrix for PV Systems," Technical Guide, 2026. [Online]. Tersedia: <https://sinobreaker.com/surge-protection-solar-systems-spd-selection-guide/>
- [30] IAEI Magazine, "Surge Protection for Photovoltaic Systems," *IAEI Magazine*, vol. March-April 2021, 2021. [Online]. Tersedia: <https://iaeimagazine.org/issue/2021-march-april/surge-protection-for-photovoltaic-systems/>
- [31] J. He, Z. Yuan, J. Xu, S. Chen, dan J. Zou, "Evaluation of the Effective Protection Distance of Low-Voltage SPD to Equipment," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 123–130, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835435.
- [32] Z. Wang, Y. Liu, dan F. Chen, "Effective Protection Distance of SPD in PV System Under Lightning Surge," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2024, doi: 10.1109/TEMPC.2024.10495163.
- [33] C. A. Christodoulou, L. Ekonomou, N. Fotis, dan I. Gonos, "Lightning Protection of PV Systems," in *Proc. Int. Conf. Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ)*, 2016.
- [34] A. Onccy, "Where Should PV Surge Arrester Be Installed? Cable Length-Based Selection Guide," Technical Application Note, Onccy Engineering, 2025. [Online]. Tersedia: <https://onccy.com/where-should-pv-surge-arrester-be-installed/>
- [35] T. N. L. Vu, M. R. Ramadhan, dan W. A. Kurniawan, "Lightning Performance Analysis of a Rooftop Grid-Connected Solar Photovoltaic Without External Lightning Protection System," *Heliyon*, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02100.