Jurnal Teknologi Industri (JTI)
Vol. 13, No. 2, Agustus 2024, hal. 75 – 83
ISSN: 2302-2191 (Print) 3030-9964 (Online)
https://doi.org/10.35968/jti.v13i2.2267

Analisa Pola Sambaran Petir Pada Jaringan Transmisi Untuk Meningkatkan Keandalan Penyaluran Pada Sutt 150 Kv Jatirangon–Cibubur

Bagus Dewok Saputra[1,*], Bekti Yulianti[2], Munnik Haryanti[3]
[1,2,3]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Dirgantara dan Industri, Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Jakarta, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 8 September 2026
Direvisi: 12 Oktober 2026
Diterima: 29 November 2026

Kata kunci:
Back Flashover
Gangguan Sambaran Petir
Sudut Lindung Petir

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis sudut lindung kawat tanah terhadap kawat fasa dan tegangan impuls petir pada SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur untuk mengidentifikasi penyebab gangguan dan menentukan mitigasi guna meningkatkan keandalan penyaluran. Metode penelitian menggunakan data historis sambaran petir dari aplikasi FALLS periode 2013–2024, data gangguan dari aplikasi FOIS, data pengukuran dimensi konstruksi tower tahun 2024, serta data pentanahan tower hasil pengukuran tahun 2023. Analisis dilakukan melalui perhitungan sudut lindung berdasarkan metode Electro Geometric Model (EGM) dan evaluasi tegangan impuls menggunakan surge impedance calculation. Hasil penelitian menunjukkan terdapat beberapa tower dengan sudut lindung lebih dari 15 derajat yang tidak memenuhi standar SPLN T5.014-1:2021, yaitu pada sirkit #1 fasa R T.6, T.8, T.10, T.12, T.14, T.15 dan sirkit #2 fasa R T.9, T.10, T.15, T.18, T.20. Seluruh tower tipe suspension berpotensi mengalami back flashover (BFO) karena tegangan impuls melebihi BIL isolator terpasang. Kesimpulannya, mitigasi dilakukan melalui modifikasi travers agar sudut lindung memenuhi standar dan penggantian isolator dengan BIL yang lebih tinggi.

Keywords:
Back Flashover
Lightning Strike Disturbance
Lightning Shielding Angle

Penulis Korespondensi:
Bagus Dewok Saputra
Email:
bagusdewok7@gmail.com

This study aims to analyze the shielding angle of the ground wire against the phase conductor and the lightning impulse voltage on the 150 kV Jatirangon–Cibubur transmission line to identify the causes of disturbances and determine mitigation measures to improve transmission reliability. The research method uses historical lightning strike data from the FALLS application for the 2013–2024 period, disturbance data from the FOIS application, tower construction dimension measurements from 2024, and tower grounding measurements from 2023. The analysis was conducted by calculating the shielding angle using the Electro Geometric Model (EGM) and evaluating lightning impulse voltage using surge impedance calculation. The results show that several towers have shielding angles exceeding 15 degrees and therefore do not comply with SPLN T5.014-1:2021, namely circuit #1 phase R T.6, T.8, T.10, T.12, T.14, T.15 and circuit #2 phase R T.9, T.10, T.15, T.18, T.20. All suspension-type towers have the potential for back flashover (BFO) because the lightning impulse voltage exceeds the installed insulator BIL. In conclusion, mitigation can be performed by modifying the tower traverses to meet the shielding angle standard and replacing the insulators with higher BIL values.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) merupakan salah satu sarana penting dalam penyaluran energi listrik melalui penghantar yang ditopang oleh menara transmisi dengan penyekat isolator[1]. SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur merupakan jaringan transmisi sepanjang 7,99 km yang terdiri atas 21 tower dan berfungsi menyalurkan energi listrik dari Gardu Induk (GI) 150 kV Jatirangon menuju GI 150 kV Cibubur[2]. Jaringan tersebut telah beroperasi sejak tahun 1983 dan merupakan aset transmisi yang dikelola oleh PT PLN (Persero) Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Barat (UIT JBB) melalui Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Cawang. Keandalan penyaluran pada jaringan transmisi sangat dipengaruhi oleh gangguan eksternal, salah satunya sambaran petir karena posisi tower yang tinggi dan berada pada area terbuka[3].

Berdasarkan data historis sambaran petir dari aplikasi FALLS (Fault Analysis and Lightning Location Software), wilayah SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur memiliki intensitas sambaran rata-rata sekitar 30 kali per tower setiap tahun. Sementara itu, berdasarkan data gangguan penyaluran pada aplikasi FOIS (Forced Outage Information System) periode 2013–2024[4], jaringan tersebut mengalami 13 kali gangguan penyaluran, dengan 8 kejadian disebabkan oleh faktor alam berupa sambaran petir pada kawat fasa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sambaran petir merupakan salah satu faktor penting yang perlu dianalisis untuk meningkatkan keandalan penyaluran energi listrik pada jaringan tersebut[5].

Gangguan akibat sambaran petir pada SUTT dapat terjadi melalui sambaran langsung pada kawat fasa maupun sambaran pada tower atau kawat tanah (Ground Shield Wire/GSW). Sambaran langsung pada kawat fasa dapat terjadi akibat kegagalan perlindungan kawat tanah atau shielding failure, sedangkan sambaran pada tower atau kawat tanah dapat menimbulkan back flashover (BFO) pada isolator[6]. Salah satu parameter yang berpengaruh terhadap shielding failure adalah sudut lindung kawat tanah terhadap kawat fasa. Berdasarkan SPLN T5.014-1:2021, sudut lindung maksimum untuk transmisi 150 kV adalah 15 derajat. Selain itu, potensi BFO dipengaruhi oleh tegangan impuls petir, sistem pentanahan tower, serta kemampuan isolator dalam menahan tegangan yang ditunjukkan oleh nilai Basic Impulse Insulation Level (BIL)[7].

Penelitian terdahulu telah membahas karakteristik petir di Indonesia, evaluasi unjuk kerja saluran udara 150 kV saat terjadi petir, serta mekanisme shielding failure dan flashover pada isolator. Namun, penelitian yang digunakan sebagai acuan dalam tugas akhir ini belum sepenuhnya menggunakan data riil lapangan pada jaringan SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur. Oleh karena itu, penelitian ini menempatkan data historis sambaran petir dari FALLS, data gangguan dari FOIS, data dimensi konstruksi tower hasil pengukuran, serta data pentanahan tower sebagai dasar analisis[8]. Pendekatan tersebut menjadi unsur keterbaruan penelitian karena analisis dilakukan secara spesifik pada kondisi aktual jaringan yang diteliti dengan menghubungkan pola sambaran petir, sudut lindung, dan potensi BFO untuk menentukan rekomendasi mitigasi[9].

Batasan penelitian meliputi analisis sudut lindung kawat tanah terhadap kawat fasa berdasarkan dimensi konstruksi tower SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur hasil pengukuran tahun 2024, analisis tegangan impuls menggunakan data arus sambaran petir dari aplikasi FALLS periode 2013–2024 dan data pentanahan tower hasil pengukuran tahun 2023, serta pembahasan gangguan akibat sambaran langsung pada kawat fasa, tower, dan kawat tanah atau GSW[10].

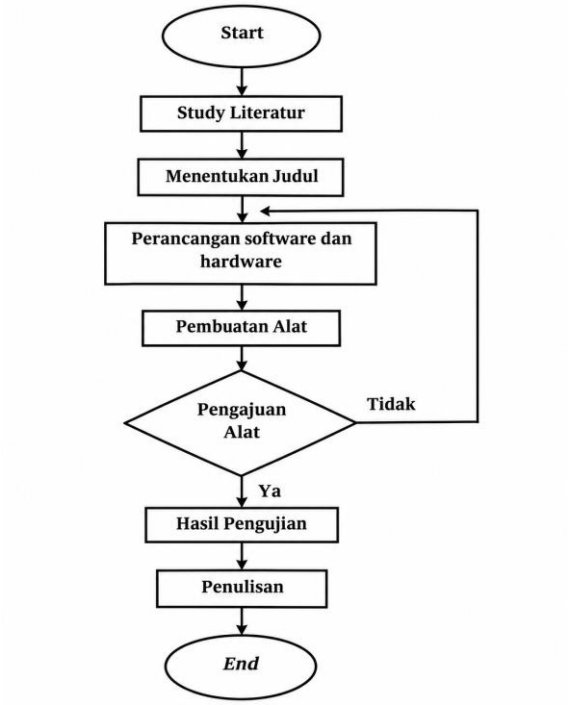
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sudut lindung kawat tanah terhadap kawat fasa pada SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur sesuai SPLN T5.014-1:2021 serta menganalisis tegangan impuls petir akibat sambaran langsung pada kawat fasa, tower, dan kawat tanah menggunakan surge impedance calculation untuk mengetahui potensi terjadinya back flashover pada isolator. Hasil analisis selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan mitigasi yang tepat untuk mengurangi gangguan akibat sambaran petir dan meningkatkan keandalan penyaluran energi listrik[11].

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan melakukan analisis terhadap data numerik yang berkaitan dengan aktivitas sambaran petir dan gangguan pada SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur. Prosedur penelitian dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan, yaitu identifikasi

masalah, penentuan tujuan penelitian, studi literatur, observasi, pengumpulan data, analisis data, dan penarikan kesimpulan. Tahapan tersebut digunakan untuk memperoleh hasil analisis yang dapat menjadi dasar dalam menentukan upaya mitigasi gangguan akibat sambaran petir.

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan gangguan sambaran petir pada jaringan SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur. Identifikasi dilakukan berdasarkan kondisi jaringan dan data historis gangguan yang tersedia. Permasalahan yang menjadi fokus penelitian meliputi kemungkinan kegagalan perlindungan kawat tanah terhadap kawat fasa (shielding failure) serta kemungkinan terjadinya back flashover pada isolator akibat sambaran petir yang mengenai tower atau kawat tanah.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Tahap selanjutnya adalah studi literatur yang dilakukan untuk memperoleh teori dan referensi yang mendukung penelitian. Studi literatur meliputi pembahasan mengenai saluran transmisi, menara transmisi, kawat fasa, kawat tanah atau Ground Shield Wire (GSW), sistem pentanahan tower, karakteristik sambaran petir, sudut lindung, shielding failure, back flashover (BFO), serta metode perhitungan impedansi surja. Standar SPLN T5.014-1:2021 digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi sudut lindung, sedangkan SPLN T5.012:2020 digunakan sebagai acuan dalam evaluasi sistem pentanahan tower.

Observasi dilakukan pada objek penelitian, yaitu jaringan SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur. Data hasil observasi dan pengukuran dimensi tower tahun 2024 digunakan untuk memperoleh parameter geometris menara yang diperlukan dalam analisis sudut lindung dan impedansi surja. Parameter yang diperoleh meliputi jenis menara, tinggi menara, elevasi, tinggi total, serta kondisi dan nilai tahanan pentanahan kaki tower.

2.1 Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode Electro-Geometric Model (EGM) untuk mengevaluasi sudut lindung (shielding angle) antara kawat tanah dan konduktor fasa. Hasil perhitungan dibandingkan dengan ketentuan SPLN T5.014-1:2021, yang menetapkan batas maksimum sudut lindung sebesar 15° pada saluran transmisi 150 kV. Selain itu, dilakukan perhitungan tegangan impuls petir menggunakan metode surge impedance calculation untuk mengetahui potensi terjadinya shielding failure dan back flashover (BFO).

Selanjutnya dilakukan evaluasi terhadap nilai Basic Insulation Level (BIL) isolator, impedansi surja, serta sistem pentanahan setiap menara transmisi. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi

lokasi yang memiliki tingkat kerawanan tinggi terhadap gangguan sambaran petir. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, disusun rekomendasi teknis berupa perbaikan geometri cross-arm atau travers, peningkatan kualitas sistem pentanahan, serta penggantian isolator dengan nilai BIL yang lebih tinggi guna meningkatkan keandalan penyaluran energi listrik pada SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur.

2.2 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah jaringan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Jatirangon–Cibubur. Penelitian difokuskan pada analisis sistem proteksi saluran terhadap gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir, khususnya yang berkaitan dengan perlindungan kawat fasa oleh Ground Shield Wire (GSW), sistem pentanahan tower, serta kemungkinan terjadinya shielding failure dan back flashover pada isolator.

Lokasi penelitian berada pada jalur SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur dengan data penelitian berupa data teknis dan hasil observasi terhadap tower yang menjadi objek analisis. Observasi dan pengukuran dimensi tower dilakukan untuk memperoleh data geometris yang diperlukan dalam proses perhitungan. Data tersebut meliputi jenis tower, tinggi tower, elevasi, tinggi total tower, posisi kawat fasa, posisi Ground Shield Wire (GSW), serta kondisi dan nilai tahanan pentanahan kaki tower.

Data pengukuran dimensi tower tahun 2024 digunakan sebagai salah satu dasar dalam melakukan analisis sudut lindung dan impedansi surja. Selanjutnya, hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi tingkat perlindungan tower dan saluran terhadap sambaran petir serta mengidentifikasi faktor yang berpotensi menyebabkan gangguan pada SUTT 150 kV Jatirangon–Cibubur.

Dalam melakukan evaluasi, penelitian mengacu pada standar yang relevan, yaitu SPLN T5.014-1:2021 sebagai acuan dalam evaluasi sudut lindung dan SPLN T5.012:2020 sebagai acuan dalam evaluasi sistem pentanahan tower.

2.3 Analisis Sudut Lindung dan Shielding Failure

Berikut adalah versi pengembangan dan perluasan dari subbab "Analisis Sudut Lindung dan Shielding Failure" agar lebih mendalam, komprehensif, dan sesuai dengan standar penulisan jurnal akademik:

Evaluasi kegagalan sudut lindung (*Shielding Failure*) dilakukan sebagai langkah krusial untuk menguji secara teknis apakah posisi penempatan kawat tanah (*Ground Shield Wire* / GSW) eksisting pada menara transmisi mampu memberikan kerucut perlindungan yang optimal terhadap kawat fasa di bawahnya. Sudut lindung (α) pada dasarnya didefinisikan sebagai sudut yang dibentuk antara garis vertikal yang ditarik dari kawat tanah ke bawah, dengan garis miring yang menghubungkan kawat tanah tersebut ke kawat fasa terluar. Fokus analisis geometri ini ditujukan secara khusus pada kawat fasa R (sebagai kawat fasa tertinggi), yang memiliki tingkat kerentanan dan eksposur paling besar terhadap ancaman sambaran petir langsung (*direct strike*).

Untuk mengetahui nilai sudut lindung secara presisi, pendekatan kalkulasi dilakukan dengan mengadopsi model geometri dari struktur menara rangka baja (*latticed steel tower*). Besarnya sudut lindung (α) pada masing-masing menara penyangga (*suspension*) maupun menara penegang (*tension*) dihitung secara matematis menggunakan persamaan 1 berikut:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{x - l}{h - y}\right) \quad (1)$$

Adapun penjabaran parameter sebagai berikut :
α = Sudut lindung terhadap kawat fasa (derajat).
x = Jarak horizontal kawat fasa terukur dari titik tengah (as) konstruksi menara (meter).
l = Jarak horizontal kawat tanah terukur dari titik tengah (as) konstruksi menara (meter).
h = Ketinggian total kawat tanah (GSW) terukur dari permukaan tanah (meter).
y = Ketinggian konduktor fasa R terukur dari permukaan tanah (meter).

Nilai sudut lindung hasil perhitungan matematis tersebut kemudian dievaluasi dan dikomparasi secara ketat menggunakan kriteria standar desain struktural kelistrikan yang berlaku di Indonesia, yaitu dokumen SPLN T5.014-1:2021 yang diterbitkan oleh PT PLN (Persero). Sesuai dengan pedoman standar tersebut, batas maksimum sudut perlindungan yang diizinkan untuk kawat tanah pada Saluran

Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dengan sistem tegangan operasi 150 kV adalah sebesar 15 derajat. Kriteria ini berlaku secara seragam untuk desain menara tipe gantung (*suspension tower*) maupun menara sudut/ujung (*tension tower*).

Evaluasi dari nilai yang dihasilkan sangat menentukan tingkat keandalan SUTT terhadap cuaca ekstrem. Nilai sudut lindung yang terukur melebihi ambang batas 15 derajat mengindikasikan bahwa zona proteksi kawat tanah telah mengalami penyempitan secara geometris. Kondisi pelebaran jarak horizontal ini menyebabkan kawat fasa keluar dari batas area kerucut perlindungan petir yang ideal. Secara karakteristik elektrofisis sambaran, petir dengan magnitudo arus yang relatif kecil (berkisar antara 10 kA hingga 20 kA) memiliki jarak lompat (*striking distance*) yang lebih pendek.

Apabila sudut lindung menara terlalu lebar (> 15 derajat), petir dengan arus kecil tersebut tidak akan "tertarik" menuju kawat tanah pelindung, melainkan akan menerobos luasan area di bawahnya dan menyambar konduktor fasa R secara langsung. Fenomena ketidakmampuan kawat tanah dalam melindungi penghantar kawat fasa dari sambaran petir langsung inilah yang diistilahkan sebagai kegagalan sudut lindung atau *Shielding Failure*. Kejadian *shielding failure* ini secara langsung akan mengakibatkan tegangan lebih surja yang merambat pada kawat fasa, dan memicu terjadinya loncatan bunga api (*flashover*) pada isolator yang bertugas menyekat kawat fasa dengan struktur menara, sehingga menyebabkan terputusnya sistem penyaluran energi listrik.

2.4 Analisis Potensi Back Flash Over (BFO)

Potensi terjadinya fenomena tembus balik atau *Back Flash Over* (BFO) pada sistem isolasi kawat fasa dievaluasi secara komprehensif menggunakan metode kalkulasi impedansi surja (*surge impedance calculation*). Fenomena *Back Flash Over* terjadi ketika gelombang petir menyambar kawat tanah (*Ground Shield Wire* / GSW) atau puncak struktur menara secara langsung (*direct strike*). Arus surja petir bermagnitudo tinggi yang menyambar menara akan mengalir menuju ke bawah melalui struktur baja menara menuju ke sistem pentanahan kaki menara (*tower footing grounding*).

Apabila sistem pentanahan memiliki nilai tahanan (R_t) yang tinggi atau menara memiliki impedansi surja yang besar, arus petir tidak dapat disalurkan dan dibuang secara cepat ke dalam bumi. Kondisi ini menyebabkan terjadinya pemantulan gelombang surja (*reflected surge wave*) ke atas, yang memicu lonjakan potensial tegangan elektrik yang sangat ekstrem pada puncak menara serta lengan penopang (*cross-arm* / travers). Kenaikan tegangan yang masif pada struktur menara ini pada akhirnya menciptakan beda potensial yang sangat tinggi antara travers dan kawat fasa bertegangan, sehingga memicu loncatan api listrik (*flashover*) yang berbalik dari struktur menara ke konduktor fasa.

Untuk mengkuantifikasi besarnya potensi BFO secara presisi, kalkulasi dilakukan dengan memperhitungkan respons transien impuls elektrik yang muncul pada puncak menara. Nilai tegangan impuls menara (V_t) dihitung melalui akumulasi tegangan akibat komponen resistif tahanan tanah dan komponen induktif struktur menara berdasarkan persamaan 3 berikut:

$$V_t = I_t \cdot R_t + L \cdot \frac{di}{dt} \qquad (2)$$

Dengan penjabaran parameter elektrikal dan geometris sebagai berikut:
V_t = Tegangan impuls surja petir yang terbangkitkan pada menara (kV).
I_t = Porsi arus surja petir yang mengalir dan terdistribusi pada struktur menara (kA).
R_t = Tahanan pentanahan kaki menara / *tower footing resistance* (Ω).
L = Induktansi ekuivalen struktur menara (μH), yang nilainya berbanding lurus dengan ketinggian total menara (H).
$\frac{di}{dt}$ = Kecuraman arus petir atau laju kenaikan arus surja terhadap waktu (kA/μs).

Besarnya arus yang mengalir pada menara (I_t) dipengaruhi oleh pembagian arus antara kawat tanah dan menara, yang dihitung dengan melibatkan nilai impedansi surja kawat tanah (Z_g) serta impedansi surja menara (Z_t). Impedansi surja menara Z_t dihitung menggunakan pendekatan model silinder/rangka berdasarkan tinggi menara (H) dan radius ekuivalen tapak kaki menara (r).

Berdasarkan besarnya tegangan impuls menara (V_t) yang dihasilkan dari kalkulasi transien, beda potensial atau tegangan efektif yang dialami oleh renceng isolator (V_{ins}) dihitung dengan menyelisihkan tegangan impuls menara terhadap tegangan operasional fasa sistem (V_{ph}) dengan persamaan 3 sebagai berikut.

$$V_{ins} = V_t - V_{ph} \quad (3)$$

Kondisi terlampauinya batas isolasi atau potensi positif terjadinya *Back Flash Over* (BFO) dinyatakan terjadi apabila nilai tegangan impuls efektif yang dialami isolator (V_{ins}) melebihi nilai ketahanan tegangan tembus impuls atau *Basic Impulse Insulation Level* (BIL) dari isolator yang terpasang pada SUTT 150 kV. Dalam penelitian ini, jenis isolator yang dievaluasi adalah isolator polimer komposit eksisting yang memiliki ambang batas ketahanan *BIL* sebesar 750 kV.

Apabila hasil simulasi menunjukkan $V_{ins} > 750$ kV, maka lapisan isolasi udara di sekitar isolator polimer akan mengalami dadal (*breakdown*), menciptakan jalur hubung singkat berimpedansi rendah yang memicu loncatan BFO dari travers ke kawat fasa R. Fenomena BFO ini secara langsung mengakibatkan gangguan hubung singkat fasa-ke-tanah (*line-to-ground fault*), yang memicu kerja sistem proteksi *relay* dan pemutusan (*trip*) Pemutus Tenaga (PMT) pada Gardu Induk, sekaligus berpotensi menimbulkan kerusakan fisik pada isolator akibat efek termal busur api listrik (*arc flash*).

2.5 Penentuan Rekomendasi Mitigasi Teknis

Tahapan akhir dari metodologi analisis dilakukan dengan memformulasikan serangkaian rekomendasi mitigasi teknis yang terukur, komprehensif, dan tepat sasaran. Perancangan skema mitigasi ini didasarkan secara langsung pada temuan akar masalah (*root cause analysis*) dari dua fenomena utama kegagalan proteksi yang teridentifikasi pada SUTT 150 kV Jatirangon – Cibubur, yakni *Shielding Failure* akibat anomali geometri sudut lindung kawat tanah, serta *Back Flash Over* (BFO) akibat kombinasi tingginya resistansi pentanahan kaki menara dan batasan ketahanan impuls isolator. Formulasi rekayasa teknik ini bertujuan untuk menekan dan meminimalkan potensi pemutusan aliran listrik (*trip*) fasa-ke-tanah, sehingga keandalan penyaluran (*distribution reliability*) energi listrik dapat ditingkatkan secara optimal.

Rancangan rekayasa mitigasi teknis yang diformulasikan mencakup empat pilar penanganan utama sebagai berikut:

1. Rekayasa Geometri Travers (*Cross-Arm Adjustment*): Sebagai solusi permanen terhadap masalah kegagalan sudut lindung (*Shielding Failure*) pada kawat fasa R yang teridentifikasi melebihi batas standar 15 derajat (seperti pada Menara T.10, T.15, dan T.6), direkomendasikan untuk melakukan modifikasi fisik pada struktur mekanis lengan menara (*cross-arm*). Rekayasa ini dilakukan dengan memperpanjang *travers* penyangga kawat fasa R atau memodifikasi tanduk puncak kawat tanah (*ground wire peak*) sehingga posisi horizontal kawat fasa berimpit atau berada di dalam cakupan kawat tanah ($x = l$). Modifikasi geometri ini bertujuan untuk mereduksi sudut lindung eksisting (α) menjadi di bawah 15 derajat, atau secara ideal mencapai 0 derajat. Berdasarkan kriteria SPLN T5.014-1:2021, sudut lindung 0 derajat akan memberikan tingkat perlindungan mutlak (*perfect shielding*) yang memblokir secara penuh potensi sambaran petir langsung pada konduktor fasa R.
2. Perbaikan Sistem Pentanahan Kaki Menara (*Grounding System Improvement*): Untuk menekan lonjakan tegangan impuls menara (V_t) yang memicu *Back Flash Over* saat terjadi sambaran petir pada kawat tanah atau puncak menara, perbaikan sistem pembumian menjadi langkah elektrikal yang fundamental. Nilai tahanan pentanahan kaki menara (R_t) pada menara-menara kritis (khususnya Menara T.16 dan T.10) wajib diturunkan agar mematuhi standar SPLN T5.012:2020 yaitu di bawah 10 Ohm, dan secara optimal ditargetkan mencapai $< 5\ \Omega$ untuk area berelevasi tinggi dengan frekuensi sambaran petir ekstrem. Metode perbaikan yang diterapkan meliputi penambahan kawat *counterpoise* horizontal yang tertanam sejajar jalur transmisi, penanaman *driven rod* vertikal hingga menyentuh lapisan tanah berkonduktivitas tinggi (*water table*), serta pengaplikasian zat aditif penurun resistivitas tanah (*grounding enhancement material* / GEM).
3. Peningkatan Kemampuan dan Penggantian Isolator: Evaluasi terhadap ketahanan tegangan tembus isolator dilakukan untuk memastikan bahwa batas *Basic Impulse Insulation Level* (BIL) isolator yang terpasang mampu menahan tegangan impuls efektif (V_{ins}) akibat surja petir. Pada menara-menara yang memiliki estimasi lonjakan tegangan surja tinggi, direkomendasikan untuk melakukan penyesuaian spesifikasi atau penggantian isolator polimer dengan tipe yang

memiliki nilai ketahanan BIL lebih tinggi (melebihi ketahanan eksisting 750 kV). Peningkatan nilai BIL ini akan memperlebar margin keamanan isolasi, sehingga lapisan udara di sekitar isolator tidak mudah mengalami dadal (*breakdown*) saat merespon tegangan impuls hasil pemantulan sistem pentanahan.

4. Pemasangan *Transmission Line Arrester* (TLA): Sebagai skema proteksi aktif tingkat lanjut (*advanced active protection*), pemasangan *Transmission Line Arrester* (TLA) sangat direkomendasikan untuk menara-menara yang memiliki risiko ganda (*double risk*)—yaitu menara yang secara bersamaan mengalami kegagalan sudut lindung dan memiliki nilai tahanan tanah yang sulit diturunkan akibat faktor geologis batuan/perbukitan (seperti Menara T.16, T.9, T.10, dan T.15). TLA dipasang secara paralel dengan renceng isolator pada kawat fasa R. Saat terjadi surja tegangan lebih yang melebihi batas operasi normal, TLA akan bertindak sebagai jalan pintas (*shunt path*) berimpedansi sangat rendah yang dengan cepat mengalihkan arus petir langsung menuju struktur menara dan bumi, sebelum tegangan surja tersebut sempat memicu *flashover* atau merusak isolator polimer.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Sudut Lindung dan *Shielding Failure*

Evaluasi performa perlindungan terhadap sambaran petir langsung pada kawat fasa dievaluasi melalui perhitungan sudut lindung (α) kawat tanah (GSW). Berdasarkan standar SPLN T5.014-1:2021, nilai maksimum sudut lindung yang diizinkan untuk SUTT 150 kV adalah 15°. Hasil perhitungan matematis pada menara penyangga (*suspension*) di SUTT 150 kV Jatirangon – Cibubur menunjukkan adanya anomali geometri yang menyebabkan pelebaran sudut lindung, khususnya pada kawat fasa R.

Sebagai representasi, perhitungan pada Menara T.9 yang memiliki jarak horizontal fasa (x) 4,20 m dan selisih vertikal (h-y) 15,10 m menghasilkan sudut lindung sebesar 14,83° yang berarti masih dalam batas aman. Sebaliknya, Menara T.10 dan T.15 yang sering terindikasi mengalami gangguan fasa-ke-tanah saat hujan badai menghasilkan nilai yang melampaui batas standar. Menara T.10 (x=4,30 m; h-y=13,30 m) memiliki sudut lindung 17,12°, sedangkan Menara T.15 (x=4,30 m; h-y=13,35 m) memiliki sudut 17,08°. Menara T.6 juga berada di ambang batas rawan dengan nilai 15,17°.

Melebarnya sudut perlindungan hingga lebih dari 15° mengakibatkan zona proteksi kawat tanah menyempit, sehingga fasa R keluar dari kerucut perlindungan petir. Akibatnya, petir dengan arus yang relatif kecil tidak tersambar oleh kawat tanah, melainkan langsung menerobos turun dan menyambar konduktor fasa R (*Shielding Failure*). Hal ini menjadi akar penyebab utama tingginya intensitas gangguan akibat petir pada fasa R sebagaimana tercatat dalam data FOIS (8 dari 13 gangguan atau 61,5%).

3.2 Analisis Potensi *Back Flash Over* (BFO)

Gangguan petir pada jaringan juga dianalisis melalui potensi terjadinya *Back Flash Over* (BFO). BFO dipicu ketika tegangan impuls menara (V_t) melampaui batas kemampuan isolasi isolator polimer yang terpasang, yaitu nilai *Basic Impulse Insulation Level* (BIL) sebesar 750 kV. Tegangan pada isolator dihitung berdasarkan tegangan menara yang dipengaruhi oleh induktansi menara dan tahanan pentanahan kaki menara (R_t).

Berdasarkan data FALLS, rata-rata arus puncak petir di jalur ini adalah 26,31 kA. Simulasi ekstrem dihitung pada Menara T.16 yang memiliki elevasi tertinggi (71,69 MDPL) dan tahanan pentanahan memburuk sebesar 15,2 Ω. Pada sambaran arus rata-rata 26,31 kA, tegangan impuls pada Menara T.16 melonjak hingga 477,31 kV, yang masih berada di bawah nilai BIL (kondisi aman). Namun, simulasi terhadap variasi arus petir membuktikan bahwa ketika arus sambaran mencapai 40 kA, tegangan isolator (V_{ins}) melonjak menjadi 807,9 kV. Mengingat *BIL* isolator hanya 750 kV, lonjakan tegangan sebesar 807,9 kV dipastikan akan memicu *Back Flash Over*.

Berbeda dengan Menara T.16, Menara T.9 yang memiliki tahanan pentanahan 8,2 Ω menghasilkan tegangan impuls menara yang jauh lebih rendah, yakni 287,94 kV pada arus 26,31 kA. Hasil ini membuktikan bahwa besarnya tahanan pentanahan (R_t) berkorelasi linier dan signifikan terhadap kemunculan *Back Flash Over*. Semakin tinggi tahanan kaki menara, semakin kecil arus petir yang dibutuhkan untuk menciptakan loncatan api balik. Menara-menara di elevasi tinggi dengan R_t >

10 Ω seperti T.10 (11,5 Ω) dan T.15 (10,8 Ω) menghadapi risiko ganda (*double risk*), yaitu rentan terhadap kegagalan sudut lindung sekaligus sangat berpotensi mengalami BFO.

3.3 Rekomendasi Teknis Mitigasi

Berdasarkan sintesis hasil analisis data historis gangguan (FOIS), pemetaan kerapatan petir (FALLS), evaluasi kriteria geometris, serta perhitungan transien *surge impedance*, diformulasikan skema mitigasi teknis yang terintegrasi untuk menekan angka pemutusan (*trip*) penyaluran pada SUTT 150 kV Jatirangon – Cibubur. Perancangan mitigasi ini berfokus pada dua pendekatan utama, yaitu perbaikan sifat elektris (*electrical improvement*) untuk meredam potensi *Back Flash Over* (BFO) dan perbaikan mekanis-struktural (*structural improvement*) untuk mengeliminasi kegagalan sudut lindung (*Shielding Failure*).
Rekomendasi teknis mitigasi yang dirancang dijabarkan secara rinci sebagai berikut:

3.3.1 Perbaikan Sistem Pentanahan Kaki Menara (*Grounding System Improvement*)

Perbaikan sistem pembumian merupakan langkah elektris fundamental untuk meredam lonjakan tegangan impuls menara (V_t) saat terjadi sambaran petir pada kawat tanah (Ground Shield Wire / GSW) atau puncak menara. Mengingat tegangan impuls menara berbanding lurus dengan nilai tahanan pentanahan ($V_t = I_t \cdot R_t + L \cdot \frac{di}{dt}$), penurunan nilai R_t secara efektif akan menekan potensi lonjakan tegangan yang melampaui batas Basic Impulse Insulation Level (BIL) isolator. Target Tahanan Pembumian: Memprioritaskan penurunan nilai tahanan kaki menara (R_t) agar berada di bawah standar maksimal SPLN T5.012:2020 yaitu $10\ \Omega$. Khusus untuk menara di area berelevasi tinggi dengan kerapatan petir ekstrem (seperti Menara T.16 dengan $R_t = 15{,}2\ \Omega$, T.10 dengan $R_t = 11{,}5\ \Omega$, T.6 dengan $R_t = 12{,}4\ \Omega$, dan T.15 dengan $R_t = 10{,}8\ \Omega$), nilai R_t direkomendasikan diturunkan hingga mencapai $< 5\ \Omega$. Metode Pelaksanaan yaitu Pemasangan Counterpoise Wire: Menambahkan kawat konduktor tembaga secara horizontal yang tertanam sejajar dengan jalur transmisi untuk memperluas area pelepasan muatan ke dalam tanah. Driven Rod Dalam: Menanam elektroda pembumian secara vertikal lebih dalam hingga menyentuh lapisan tanah dengan resistivitas rendah (water table). Aplikasi Grounding Enhancement Material (GEM): Menggunakan zat aditif semen konduktif atau bentonit pada sekitar elektroda untuk menstabilkan konduktivitas tanah, terutama pada area perbukitan berelevasi tinggi yang cenderung kering.

3.3.2 Rekayasa Geometri Travers dan *Cross-Arm*

Sebagai solusi permanen terhadap masalah kegagalan sudut lindung (Shielding Failure) pada kawat fasa R yang teridentifikasi tidak standar ($\alpha > 15^\circ$ pada Menara T.10, T.15, T.6, dan T.20), direkomendasikan untuk melakukan modifikasi fisik pada lengan menara (cross-arm). Mekanisme Modifikasi: Memperpanjang travers penyangga kawat fasa R atau menyesuaikan dudukan puncak kawat tanah (ground wire peak) sehingga jarak horizontal kawat fasa dari as menara (x) berimpit atau berada di dalam cakupan jarak kawat tanah (l), yaitu $x = l$. Target Kinerja Proteksi: Modifikasi ini dirancang untuk mereduksi sudut lindung eksisting dari kisaran $15,17^\circ - 17,12^\circ$ menjadi 0°. Berdasarkan pedoman SPLN T5.014-1:2021, sudut lindung 0° memberikan tingkat perlindungan mutlak (perfect shielding). Kondisi ini memastikan kawat fasa R berada sepenuhnya di dalam kerucut perlindungan kawat tanah, sehingga mengeliminasi probabilitas sambaran petir langsung (direct strike) pada konduktor fasa R secara keseluruhan.

3.3.3 Pemasangan Transmission Line Arrester (TLA) pada Menara Kritis

Untuk menara yang memiliki risiko ganda (double risk)—yakni menara yang secara bersamaan mengalami kegagalan sudut lindung geometri dan memiliki potensi BFO tinggi akibat kondisi geologis tanah yang sulit diturunkan nilai pembumiannya—direkomendasikan pemasangan Transmission Line Arrester (TLA) sebagai skema proteksi aktif. Alokasi Prioritas TLA: Pemasangan TLA diprioritaskan pada fasa R di menara-menara dengan profil risiko ekstrem, seperti: Menara T.9: Menara dengan arus puncak petir rata-rata tertinggi (26,31 kA). Menara T.10 & T.15 dimana menara dengan sudut lindung paling kritis ($> 17^\circ$) serta nilai $R_t > 10\ \Omega$. Prinsip Kerja Proteksi TLA berbasis Metal-Oxide Varistor (MOV) dipasang secara paralel dengan renceng isolator polimer. Saat mendeteksi gelombang surja tegangan lebih yang melebihi ambang batas operasi normal, TLA akan bertindak sebagai jalan pintas (shunt path) berimpedansi sangat rendah. Arus petir akan dialihkan secara langsung menuju struktur

menara dan dibuang ke bumi sebelum sempat memicu loncatan api (flashover) pada isolator, sehingga batas BIL isolator sebesar 750 kV tetap terjaga aman dan pemutusan aliran listrik (trip) dapat dicegah.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi dan analisis pola sambaran petir pada SUTT 150 kV Jatirangon – Cibubur, dapat disimpulkan bahwa tingginya angka gangguan pemutusan (trip) penyaluran energi listrik pada fasa R diakibatkan oleh dua fenomena kegagalan proteksi yang bekerja secara bersamaan, yaitu kegagalan sudut lindung (shielding failure) dan potensi tembus balik (back flash over atau BFO). Hasil perhitungan matematis menunjukkan adanya anomali geometri pada menara penyangga (suspension) seperti menara T.6, T.10, T.15, dan T.20, di mana nilai sudut lindung melebihi standar aman SPLN yaitu 15°. Kondisi paling kritis terjadi pada menara T.10 (17,12°) dan T.15 (17,08°), yang menyebabkan kawat fasa R berada di luar kerucut perlindungan kawat tanah dan sangat rentan terhadap sambaran petir langsung. Selain itu, tingginya nilai tahanan pentanahan kaki menara (R_t) di area berelevasi tinggi sangat memengaruhi kerentanan sistem terhadap BFO. Menara T.16 yang berada di elevasi tertinggi (71,69 MDPL) dengan tahanan tanah 15,2 Ω merupakan titik paling kritis, di mana arus petir sebesar 35 kA hingga 40 kA sudah mampu membangkitkan tegangan yang melampaui kemampuan Basic Impulse Insulation Level (BIL) isolator sebesar 750 kV, sehingga memicu terjadinya loncatan api balik dari struktur menara ke kawat fasa. Untuk meningkatkan keandalan penyaluran listrik, mitigasi yang direkomendasikan adalah melakukan perbaikan sistem pentanahan agar nilai R_t turun di bawah 10 Ω, melakukan rekayasa geometri pada lengan menara (cross-arm) agar sudut lindung sesuai standar, serta memasang Transmission Line Arrester (TLA) pada menara-menara yang memiliki risiko ganda.

DAFTAR PUSTAKA

[1] C. Andreas, O. Nainggolan, and T. Nur, “Pembangunan Gardu Induk 150 kV Lautan Baja Indonesia,” vol. 2, no. 3, 2025.

[2] D. Sari and I. Aflaha, “Dwi Sari Ida Aflaha Universitas Kahuripan Kediri,” vol. 2, no. 6, pp. 1281–1296, 2025.

[3] M. A. A. Azka, “Jaringan Transmisi Gardu Induk Sekayu 150 KV,” vol. 2, no. 4, 2024.

[4] B. Winardi and E. W. Sinuraya, “PENGISIAN BATERAI DARI PANEL SURYA BERBASIS ARDUINO,” no. 3, 2026, doi: 10.14710/transmisi.28.3.204-213.

[5] N. Kn, R. Asnawi, I. Rosadi, and H. Jati, “Low Carbon Electricity Energy Management Analysis and KWH Usage Using Six Sigma Method,” *2025 Int. Conf. Converging Technol. Electr. Inf. Eng.*, pp. 7–11, 2025, doi: 10.1109/ICCTEIE66144.2025.11341874.

[6] T. Covrig, A. Ciobotaru, P. Bejan, L. Farmathy-pop, S. Oltean, and L. Miclea, “Consumption in the Context of Industry 4 . 0,” 2024.

[7] P. Utomo, “STUDI ANALISIS KUALITAS TRANSFORMATOR DAYA GARDU INDUK 150 KV SIANTAN”.

[8] A. P. Purnomoadi, P. Agus, and A. Pramana, “KARAKTERISTIK PETIR INDONESIA DAN PENGGUNAANNYA DALAM EVALUASI UNJUK KERJA SALURAN UDARA 150 KV SAAT TERJADI SAMBARAN PETIR,” vol. 9, no. 1, pp. 46–53.

[9] P. M. G. Muda and S. Geofisika, “KORELASI KERAPATAN PETIR DENGAN KEPADATAN BANGUNAN DI KECAMATAN KULISUSU KABUPATEN BUTON UTARA PROVINSI SULAWESI TENGGARA,” no. 5.

[10] F. S. Silalahi, H. Tumaliang, and L. S. Patras, “Perencanaan Jaringan Transmisi GI Otam – GI Molibagu 150 kV,” pp. 1–8.

[11] N. Kn, “Optimizing Low Carbon Emission Energy Management in Universities : a Literature Review,” pp. 279–296, 2025, doi: 10.5281/zenodo.15081165.