

Analisis Statistik dan Strategi Mitigasi Gangguan Transmisi Akibat Sambaran Petir Berbasis Data Historis UPT Bandung Tahun 2021–2025

Ega Satriyo Utomo*, Widya Nita Suliyanti

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: ega2410722@itpln.ac.id*, widya@itpln.ac.id

Keywords:

lightning strikes, transmission line, Electro-Geometric Model, back flashover, shielding failure, grounding system

Abstract

Lightning strikes are one of the major causes of transmission line disturbances that affect power system reliability. This study analyzes the relationship between lightning strikes and disturbances on the 150 kV transmission system of PT PLN (Persero) UPT Bandung during 2021–2025 and evaluates the influence of tower characteristics using the Electro-Geometric Model (EGM). The analysis was conducted using historical data and simulations on three representative towers, namely T-047, T-032, and T-018, using Back Flashover Rate (BFR), Back Flashover Outage Rate (BFOR), Shielding Failure Rate (SFR), and Shielding Failure Flashover Outage Rate (SFFOR) as evaluation parameters. The results show an average of 158,942.8 lightning strikes/year and 19.2 disturbances/year, with a moderate relationship between lightning activity and transmission disturbances. The simulation results show BFR values of 141.4, 163.3, and 121.6 disturbances/100 km/year for T-047, T-032, and T-018, respectively, while the corresponding BFOR values are 74.90, 17.16, and 4.64 disturbances/100 km/year. The SFR values are 0.331, 0.942, and 0.393, while the SFFOR values are 0.324, 0.933, and 0.387 disturbances/100 km/year, respectively. T-047 has the highest total disturbance rate of 75.22 disturbances/100 km/year, making it the highest-priority tower for mitigation. The recommended strategies include improving the grounding system to achieve a grounding resistance target of $<5 \Omega$, evaluating the shield wire configuration at T-032, optimizing lightning arrester installation, and implementing condition-based inspection and maintenance, with intensive inspection prioritized before the rainy season. The results indicate that improving grounding quality should be prioritized because BFOR consistently exceeds SFFOR.

Kata kunci:

sambaran petir, saluran transmisi, Electro-Geometric Model, back flashover, shielding failure, sistem pentanahan.

Abstrak

Sambaran petir merupakan salah satu penyebab gangguan pada saluran transmisi yang memengaruhi keandalan sistem tenaga listrik. Penelitian ini menganalisis hubungan sambaran petir dan gangguan transmisi 150 kV PT PLN (Persero) UPT Bandung periode 2021–2025 serta mengevaluasi pengaruh karakteristik menara menggunakan Electro-Geometric Model (EGM). Analisis dilakukan berdasarkan data historis dan simulasi pada tiga tower representatif, yaitu T-047, T-032, dan T-018, dengan parameter Back Flashover Rate (BFR), Back Flashover Outage Rate (BFOR), Shielding Failure Rate (SFR), dan Shielding Failure Flashover Outage Rate (SFFOR). Hasil analisis menunjukkan rata-rata sambaran petir sebesar 158.942,8 kejadian/tahun dan gangguan sebesar 19,2 kejadian/tahun, dengan hubungan keduanya berada pada kategori sedang. Hasil simulasi menunjukkan BFR

berturut-turut sebesar 141,4; 163,3; dan 121,6 gangguan/100 km/tahun untuk T-047, T-032, dan T-018, sedangkan BFOR masing-masing sebesar 74,90; 17,16; dan 4,64 gangguan/100 km/tahun. Nilai SFR sebesar 0,331; 0,942; dan 0,393, sedangkan SFFOR sebesar 0,324; 0,933; dan 0,387 gangguan/100 km/tahun. Total gangguan tertinggi terdapat pada T-047 sebesar 75,22 gangguan/100 km/tahun, sehingga menjadi prioritas mitigasi. Strategi yang direkomendasikan meliputi perbaikan sistem pentanahan dengan target tahanan $<5 \Omega$, evaluasi konfigurasi shield wire pada T-032, optimalisasi lightning arrester, serta inspeksi dan pemeliharaan berbasis kondisi, dengan prioritas inspeksi sebelum periode musim hujan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kualitas pentanahan menjadi prioritas utama karena nilai BFOR secara konsisten lebih tinggi dibandingkan SFFOR.

PENDAHULUAN

Keandalan sistem transmisi tenaga listrik merupakan elemen krusial dalam memastikan keberlangsungan penyaluran energi listrik dari pembangkit menuju konsumen. Tingkat keandalan tersebut tidak semata-mata bergantung pada desain dan mutu peralatan yang digunakan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal, terutama kondisi lingkungan serta fenomena alam yang bersifat tidak menentu (Voinov et al., 2020). Dalam sistem transmisi modern, gangguan akibat faktor lingkungan menjadi salah satu tantangan utama dalam menjaga stabilitas operasi sistem tenaga listrik.

Salah satu faktor eksternal yang memiliki pengaruh paling besar adalah sambaran petir. Aktivitas petir dikenal sebagai penyebab dominan gangguan pada saluran transmisi udara, khususnya di daerah tropis dengan tingkat kerapatan sambaran yang tinggi seperti Indonesia (Nguyen et al., 2021). Dampak yang ditimbulkan oleh sambaran petir tidak bersifat seragam, melainkan dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis gangguan spesifik, seperti *flashover* pada isolator, *back flashover* akibat kegagalan sistem pentanahan, gangguan hubung singkat (*short circuit*), serta trip pada sistem proteksi yang berujung pada terhentinya penyaluran daya listrik. Gangguan-gangguan tersebut secara langsung berkontribusi terhadap menurunnya tingkat keandalan sistem transmisi.

Berdasarkan data historis gangguan transmisi UPT Bandung periode 2021–2025, tercatat sebanyak 210 kejadian gangguan, di mana faktor petir menjadi penyebab dominan dengan total 90 kejadian. Dominasi gangguan akibat petir ini menunjukkan bahwa faktor atmosfer memiliki kontribusi yang signifikan terhadap performa sistem transmisi. Temuan ini sejalan dengan penelitian terbaru yang menyatakan bahwa gangguan akibat petir masih menjadi penyumbang utama gangguan pada sistem transmisi di wilayah dengan intensitas petir tinggi.

Selain itu, jumlah sambaran petir selama periode pengamatan menunjukkan fluktuasi yang signifikan. Pada tahun 2022 tercatat jumlah sambaran tertinggi sebesar 211.437 kejadian, sedangkan pada tahun 2025 mengalami penurunan drastis menjadi 69.139 kejadian. Namun demikian, penurunan jumlah sambaran tidak selalu sejalan dengan penurunan jumlah gangguan. Bahkan pada tahun 2025, rasio antara gangguan dan sambaran petir justru meningkat dan menjadi yang tertinggi selama periode pengamatan. Fenomena ini mengindikasikan adanya ketidaksesuaian antara intensitas sambaran petir dan jumlah gangguan yang terjadi.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara sambaran petir dan gangguan transmisi tidak dapat dijelaskan secara sederhana hanya berdasarkan jumlah kejadian. Berbagai studi mengungkapkan bahwa gangguan akibat petir dipengaruhi oleh sejumlah faktor teknis, seperti kualitas sistem pentanahan, karakteristik isolator, konfigurasi jaringan transmisi, serta tingkat efektivitas sistem proteksi petir yang digunakan. Dengan demikian, analisis yang hanya menitikberatkan pada jumlah sambaran petir belum memadai untuk menjelaskan mekanisme terjadinya gangguan secara menyeluruh.

Berdasarkan kondisi tersebut, pendekatan penelitian dalam studi ini tidak difokuskan pada pemodelan matematis atau prediksi risiko, melainkan diarahkan pada analisis hubungan sebab-akibat antara sambaran petir dan jenis gangguan yang terjadi pada sistem transmisi. Melalui pendekatan ini, setiap peristiwa gangguan dianalisis berdasarkan karakteristiknya, sehingga dapat diidentifikasi pola keterkaitan antara fenomena petir dan respons sistem transmisi (Zand et al., 2021).

Gangguan pada saluran transmisi akibat sambaran petir dapat berupa flashover, back flashover, short circuit, trip sistem proteksi, dan over voltage. Flashover terjadi ketika tegangan lebih melebihi kemampuan isolasi, sedangkan back flashover terjadi akibat kenaikan potensial tower yang menyebabkan loncatan listrik menuju konduktor fasa. Sambaran petir juga dapat memicu hubung singkat, mengaktifkan sistem proteksi untuk mengisolasi gangguan, serta menimbulkan tegangan lebih sesaat yang berpotensi merusak peralatan transmisi. Penelitian ini difokuskan pada identifikasi bagian penghantar dan tower yang paling rentan terhadap gangguan petir berdasarkan data historis, kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan strategi mitigasi seperti peningkatan kualitas pentanahan, optimalisasi lightning arrester, dan pemeliharaan berbasis kondisi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara intensitas sambaran petir dan jumlah gangguan pada saluran transmisi 150 kV PT PLN (Persero) UPT Bandung selama periode 2021–2025, serta mengevaluasi mekanisme gangguan menggunakan metode Electro-Geometric Model (EGM). Analisis dilakukan berdasarkan parameter Shielding Failure Rate (SFR), Shielding Failure Flashover Outage Rate (SFFOR), Back Flashover Rate (BFR), dan Back Flashover Outage Rate (BFOR) pada tower representatif. Hasil analisis tersebut digunakan untuk menentukan strategi mitigasi yang tepat guna meningkatkan keandalan sistem transmisi. Penelitian diharapkan dapat memberikan informasi bagi PT PLN (Persero) UPT Bandung mengenai mekanisme dominan gangguan petir, menjadi dasar penentuan prioritas pemeliharaan sistem pentanahan dan proteksi petir, serta menambah referensi ilmiah terkait penerapan metode EGM pada sistem transmisi tenaga listrik.

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada saluran transmisi udara 150 kV di wilayah kerja PT PLN (Persero) UPT Bandung dengan data historis sambaran petir, gangguan transmisi, dan data teknis tower periode 2021–2025. Analisis dilakukan melalui statistik deskriptif, perhitungan rasio gangguan, klasifikasi gangguan menjadi Back Flashover, Shielding Failure, dan non-petir, serta simulasi EGM pada tower representatif. Evaluasi teknis dibatasi pada perhitungan BFR, BFOR, SFR, dan SFFOR tanpa membahas koordinasi isolasi secara rinci, simulasi elektromagnetik transien, maupun analisis ekonomi. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi data historis gangguan dengan analisis EGM melalui klasifikasi gangguan dan pemilihan tower representatif, sehingga tidak hanya menghasilkan nilai tingkat gangguan,

tetapi juga dapat mengidentifikasi mekanisme gangguan yang dominan dan memberikan rekomendasi mitigasi yang lebih spesifik dan aplikatif.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada jaringan transmisi tegangan tinggi di wilayah kerja PT PLN (Persero) UPT Bandung. Objek penelitian berupa saluran transmisi yang memiliki riwayat gangguan akibat sambaran petir selama periode 2021–2025. Data penelitian diperoleh dari dokumentasi operasional UPT Bandung, meliputi data sambaran petir, gangguan saluran transmisi, data teknis tower, dan sistem proteksi petir.

Desain Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis statistik deskriptif dan metode Electro-Geometric Model (EGM). Analisis statistik digunakan untuk mengetahui karakteristik sambaran petir dan gangguan transmisi serta menentukan saluran dan tower yang memiliki tingkat gangguan tertinggi. Selanjutnya, metode EGM digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem proteksi petir dan mengidentifikasi mekanisme gangguan pada tower terpilih.

Tahapan penelitian meliputi pengumpulan dan validasi data, analisis statistik, penentuan penghantar dan tower kritis, klasifikasi gangguan, simulasi EGM, serta analisis hasil simulasi. Simulasi dilakukan pada tiga tower representatif, yaitu Tower T-018, T-032, dan T-047.

Metode Pengumpulan Data

Data penelitian merupakan data sekunder yang diperoleh melalui studi dokumentasi PT PLN (Persero) UPT Bandung. Data yang dikumpulkan meliputi:

1. Data historis sambaran petir periode 2021–2025.
2. Data gangguan saluran transmisi pada periode yang sama.
3. Data teknis tower dan saluran transmisi.
4. Data sistem proteksi dan parameter yang diperlukan dalam perhitungan EGM.

Seluruh data diverifikasi dan divalidasi sebelum digunakan dalam analisis. Data yang telah valid kemudian disusun sebagai basis data penelitian untuk analisis statistik dan simulasi EGM.

Data Penelitian

Data penelitian terdiri atas data sambaran petir dan data gangguan sistem transmisi. Data sambaran petir digunakan untuk mengetahui tingkat aktivitas petir selama periode penelitian. Parameter yang digunakan meliputi jumlah sambaran petir tahunan, distribusi sambaran petir, Ground Flash Density (GFD), dan Line Flash Density (LFD). Data gangguan digunakan untuk mengetahui frekuensi dan jenis gangguan yang terjadi pada saluran transmisi. Gangguan diklasifikasikan berdasarkan mekanismenya menjadi Shielding Failure, Back Flashover, dan gangguan non-petir.

Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu analisis statistik deskriptif, perhitungan rasio gangguan, penentuan tower representatif, klasifikasi gangguan, simulasi EGM, dan analisis hasil simulasi. Analisis statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik data sambaran petir dan gangguan transmisi selama periode 2021–2025. Parameter yang dianalisis meliputi nilai rata-rata, nilai maksimum dan minimum, simpangan

baku, serta rasio gangguan terhadap jumlah sambaran petir. Hasil analisis digunakan untuk mengetahui kecenderungan gangguan setiap tahun dan menentukan saluran yang memiliki tingkat gangguan paling tinggi. Rasio gangguan dihitung dengan membandingkan jumlah gangguan terhadap jumlah sambaran petir. Analisis ini digunakan untuk mengetahui kecenderungan tingkat gangguan dan mengevaluasi efektivitas sistem proteksi petir selama periode penelitian. Nilai rasio kemudian dibandingkan antar tahun untuk mengetahui perubahan tingkat keandalan sistem transmisi. Tower representatif dipilih berdasarkan frekuensi gangguan akibat petir, karakteristik geometris tower, konfigurasi penghantar dan kawat tanah, serta kondisi teknis saluran. Berdasarkan hasil identifikasi, tower yang digunakan dalam simulasi adalah Tower T-018, T-032, dan T-047. Gangguan transmisi diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu:

1. Shielding Failure, yaitu gangguan akibat sambaran petir langsung mengenai penghantar fasa karena kegagalan sistem perlindungan kawat tanah.
2. Back Flashover, yaitu gangguan akibat kenaikan tegangan pada tower ketika sambaran petir menyebabkan tegangan melebihi kemampuan isolasi.
3. Gangguan non-petir, yaitu gangguan yang disebabkan oleh faktor selain sambaran petir, seperti vegetasi, kegagalan peralatan, binatang, atau faktor eksternal lainnya.

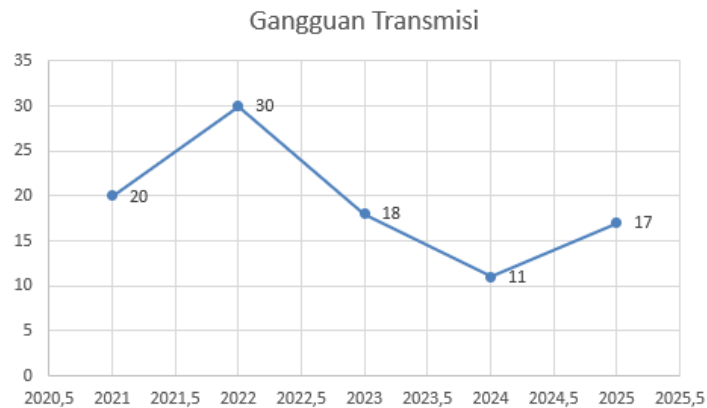
Hasil klasifikasi digunakan sebagai dasar dalam menentukan mekanisme gangguan yang dominan. Metode EGM digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem proteksi petir pada tiga tower representatif. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan parameter teknis tower dan saluran, seperti tinggi tower, posisi penghantar dan kawat tanah, tahanan pentanahan, tegangan kritis isolator, GFD, dan LFD. Parameter yang dihitung meliputi:

1. Back Flashover Rate (BFR), untuk memperkirakan tingkat kejadian back flashover.
2. Back Flashover Outage Rate (BFOR), untuk memperkirakan tingkat gangguan akibat back flashover berdasarkan probabilitas arus petir melebihi arus kritis.
3. Shielding Failure Rate (SFR), untuk memperkirakan tingkat kegagalan perlindungan akibat sambaran langsung pada penghantar.
4. Shielding Failure Flashover Outage Rate (SFFOR), untuk memperkirakan tingkat gangguan akibat shielding failure yang menyebabkan flashover.
5. Perhitungan dilakukan berdasarkan parameter teknis masing-masing tower dan mengacu pada standar yang relevan, seperti IEEE dan CIGRE.

Hasil simulasi EGM pada Tower T-018, T-032, dan T-047 dibandingkan berdasarkan nilai SFR, SFFOR, BFR, dan BFOR. Hasil perbandingan digunakan untuk menentukan mekanisme gangguan yang paling dominan dan mengetahui pengaruh karakteristik tower terhadap tingkat kerawanan gangguan. Berdasarkan hasil tersebut, selanjutnya dirumuskan rekomendasi mitigasi yang sesuai untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi petir pada saluran transmisi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Tren Gangguan Transmisi

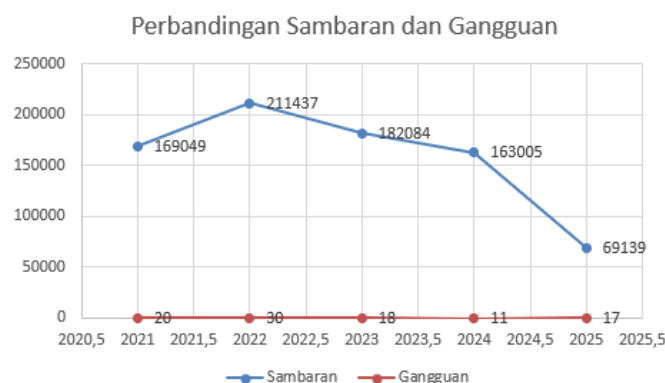


Gambar 1 Grafik Gangguan Transmisi

Hasil grafik gangguan pada diatas, menunjukkan bahwa jumlah gangguan transmisi cenderung lebih stabil dibandingkan dengan jumlah sambaran petir. Meskipun terjadi peningkatan gangguan pada tahun 2022 yang sejalan dengan tingginya intensitas sambaran petir, tren pada tahun-tahun berikutnya tidak memperlihatkan hubungan yang konsisten. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem transmisi memiliki kemampuan tertentu dalam meredam pengaruh eksternal, sehingga tidak seluruh sambaran petir berujung pada gangguan operasional.

Stabilitas jumlah gangguan tersebut juga didukung oleh nilai simpangan baku yang relatif kecil (6,91), yang menunjukkan bahwa tingkat fluktuasi gangguan jauh lebih rendah dibandingkan fluktuasi sambaran petir. Dengan demikian, sistem transmisi memperlihatkan karakteristik respons yang lebih terkendali terhadap pengaruh eksternal. Namun demikian, peningkatan gangguan pada kondisi tertentu mengindikasikan bahwa kemampuan sistem dalam menahan gangguan tidak selalu optimal dan sangat dipengaruhi oleh kondisi internal yang ada.

Analisis Perbandingan Sambaran dan Gangguan

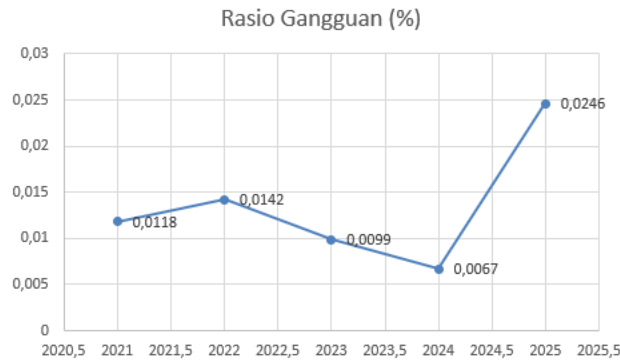


Gambar 2 Grafik Perbandingan Sambaran vs Gangguan

Perbandingan antara jumlah sambaran petir dan gangguan transmisi pada gambar diatas, menunjukkan adanya ketidaksesuaian pola yang cukup signifikan. Dalam kondisi ideal, peningkatan jumlah sambaran petir seharusnya diikuti oleh kenaikan jumlah gangguan. Namun, berdasarkan data penelitian, pola tersebut tidak selalu terjadi, khususnya pada periode tahun 2023 hingga 2025.

Fenomena ini menjadi indikasi kuat bahwa hubungan antara sambaran petir dan gangguan transmisi tidak bersifat linier. Hal ini dapat dijelaskan oleh adanya lapisan proteksi pada sistem transmisi yang mampu meredam sebagian besar dampak sambaran petir, sehingga hanya sebagian kecil yang berkembang menjadi gangguan. Dengan demikian, perbandingan kedua variabel tersebut menunjukkan bahwa faktor teknis dalam sistem memiliki peran yang lebih dominan dibandingkan faktor eksternal dalam menentukan terjadinya gangguan.

Analisis Rasio Gangguan sebagai Indikator Kinerja Sistem



Gambar 3 Grafik Rasio Gangguan

Nilai rasio antara gangguan dan sambaran petir yang ditampilkan pada diatas memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap kinerja sistem transmisi. Berbeda dengan jumlah absolut sambaran maupun gangguan, rasio ini mampu merefleksikan tingkat efektivitas sistem dalam menahan dampak sambaran petir. Nilai rasio yang rendah menunjukkan bahwa sistem beroperasi secara optimal, sedangkan rasio yang tinggi mengindikasikan adanya penurunan performa sistem.

Pada tahun 2025, nilai rasio mencapai tingkat tertinggi meskipun jumlah sambaran petir berada pada titik terendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem transmisi pada periode tersebut menjadi lebih rentan terhadap gangguan. Hal ini dapat disebabkan oleh penurunan kinerja sistem proteksi atau perubahan karakteristik jaringan yang mengakibatkan sistem kurang efektif dalam meredam energi sambaran petir. Oleh karena itu, rasio gangguan dapat dijadikan sebagai indikator utama dalam mengevaluasi performa sistem transmisi.

Analisis Sebab Akibat Gangguan Transmisi Akibat Sambaran Petir

Berdasarkan hasil pengolahan data historis gangguan transmisi UPT Bandung periode 2021 - 2025, diketahui bahwa faktor petir merupakan penyebab dominan gangguan dengan total 90 kejadian, sehingga menjadi kontributor terbesar dibandingkan penyebab lainnya. Dominasi ini menunjukkan bahwa fenomena gangguan pada sistem transmisi memiliki keterkaitan sebab akibat yang kuat dengan aktivitas sambaran petir, khususnya dalam kategori gangguan yang dipicu oleh faktor alam.

Secara fisik, mekanisme gangguan akibat petir terjadi melalui pembentukan arus impuls dengan magnitudo tinggi yang menimbulkan tegangan lebih (*transient overvoltage*) pada saluran transmisi. Tegangan lebih ini dapat melampaui kemampuan isolasi sistem, sehingga memicu terjadinya *flashover* pada isolator maupun *back flashover* pada struktur menara (*tower*). Kondisi tersebut selanjutnya menyebabkan arus gangguan mengalir dalam sistem dan terdeteksi oleh *relay* proteksi, yang pada akhirnya mengaktifkan mekanisme *trip* pada sistem transmisi. Dengan demikian, hubungan sebab akibat antara sambaran petir dan

gangguan transmisi dapat dijelaskan secara berurutan berdasarkan mekanisme kerja sistem tenaga listrik yang jelas.

Namun demikian, berdasarkan hasil analisis data, hubungan tersebut tidak bersifat linier. Hal ini terlihat pada tahun 2025, di mana jumlah sambaran petir mengalami penurunan signifikan hingga 69.139 kejadian, namun jumlah gangguan justru meningkat kembali menjadi 17 kejadian, serta menghasilkan nilai rasio gangguan tertinggi sebesar 0,017%. Fenomena ini menunjukkan bahwa intensitas sambaran petir bukan satu-satunya faktor yang menentukan terjadinya gangguan, melainkan sangat dipengaruhi oleh kondisi teknis sistem transmisi itu sendiri.

Temuan paling signifikan dalam penelitian ini adalah adanya kondisi di mana tingginya jumlah sambaran petir tidak selalu diikuti oleh terjadinya gangguan. Beberapa penghantar dengan intensitas sambaran yang besar bahkan tidak mengalami gangguan sama sekali. Hal ini mengindikasikan bahwa kinerja sistem proteksi, seperti kualitas sistem pentanahan dan efektivitas *lightning arrester*, memiliki peran yang sangat dominan dalam meredam dampak sambaran petir. Dengan demikian, hubungan sebab akibat dalam sistem transmisi bersifat kompleks dan tidak hanya dipengaruhi oleh faktor eksternal, tetapi juga oleh kesiapan serta kualitas sistem internal.

Tabel 1 Distribusi Penyebab Gangguan Transmisi UPT Bandung (2021–2025)

No	Penyebab Gangguan	Jumlah Kejadian	Persentase (%)
1	Petir	90	42,86
2	Layang-layang	74	35,24
3	Lainnya	46	21,90
	Total	210	100%

Dari Tabel diatas, dapat dilihat bahwa gangguan akibat petir memberikan kontribusi terbesar, yaitu sebesar 42,86% dari total gangguan, sehingga dapat dikategorikan sebagai penyebab dominan. Dominasi ini semakin menegaskan bahwa mekanisme utama gangguan pada sistem transmisi berkaitan erat dengan fenomena tegangan lebih akibat sambaran petir. Selanjutnya, untuk melihat distribusi spasial gangguan, disajikan pada tabel berikut:

Tabel 2 Penghantar dengan Gangguan Tertinggi

No	Nama Penghantar	Jumlah Gangguan
1	TRS 70 kV Cigereleng–Cikalong	21
2	TRS 70 kV Cigereleng–Majalaya	10
3	TRS 70 kV Ujungberung–Sumedang	8

Distribusi pada diatas, Analisis lebih lanjut terhadap distribusi spasial menunjukkan bahwa gangguan tidak terdistribusi secara merata, melainkan terkonsentrasi pada penghantar tertentu. Data menunjukkan bahwa TRS 70 kV Cigereleng - Cikalong merupakan penghantar dengan jumlah gangguan tertinggi (21 kejadian), diikuti oleh TRS 70 kV Cigereleng - Majalaya dan TRS 70 kV Ujungberung - Sumedang. Konsentrasi gangguan ini mengindikasikan adanya pengaruh faktor lokal, seperti kondisi sistem pentanahan, karakteristik isolasi, serta konfigurasi jaringan yang turut menentukan tingkat kerentanan terhadap gangguan akibat petir.

Selain itu, distribusi temporal gangguan disajikan pada tabel berikut:

Tabel 3 Rentang Gangguan

Rentang Waktu (WIB)	Frekuensi Dominan
13.00–14.00	Tinggi
14.00–15.00	Tinggi
15.00–16.00	Sangat Tinggi
16.00–17.00	Tinggi

17.00–18.00**Tinggi**

Selain itu pada tabel diatas, dapat dilihat analisis temporal menunjukkan bahwa gangguan dominan terjadi pada rentang waktu 13.00 - 18.00 WIB, dengan puncak kejadian pada pukul 15.00 - 16.00 WIB. Pola ini sejalan dengan karakteristik aktivitas petir yang cenderung meningkat pada periode siang hingga sore hari akibat proses konveksi atmosfer. Di sisi lain, analisis musiman menunjukkan bahwa frekuensi gangguan meningkat pada awal dan akhir tahun, yang berkorelasi dengan tingginya intensitas curah hujan.

Analisis Kinerja Sistem Transmisi

Kinerja sistem transmisi dalam menghadapi gangguan akibat petir sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis, seperti kualitas sistem pentanahan, kondisi isolator, serta kinerja *lightning arrester*. Sistem pentanahan yang baik mampu menyalurkan arus petir ke tanah secara cepat dan efektif, sehingga dapat mengurangi kemungkinan terjadinya *back flashover*.

Selain itu, kondisi isolator turut berperan penting dalam menentukan batas ketahanan sistem terhadap tegangan lebih. Isolator yang mengalami degradasi cenderung lebih rentan mengalami kegagalan, sehingga meningkatkan potensi terjadinya gangguan. Dengan demikian, kinerja sistem transmisi tidak hanya dipengaruhi oleh desain awal, tetapi juga sangat ditentukan oleh kondisi operasional serta kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara berkelanjutan.

Strategi Mitigasi Berbasis Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil analisis sebab akibat yang telah dilakukan, strategi mitigasi gangguan transmisi akibat sambaran petir dalam penelitian ini disusun secara spesifik dan berbasis data historis, bukan menggunakan pendekatan umum. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan efektivitas upaya mitigasi dengan menargetkan area, waktu, serta kondisi sistem yang terbukti memiliki tingkat kerentanan tinggi.

Strategi mitigasi pertama difokuskan pada penghantar dengan tingkat gangguan tertinggi, yaitu TRS 70 kV Cigereleng - Cikalong, TRS 70 kV Cigereleng - Majalaya, serta TRS 70 kV Ujungberung - Sumedang. Ketiga penghantar tersebut menjadi prioritas utama dalam pelaksanaan inspeksi, pemeliharaan, dan peningkatan sistem proteksi. Pendekatan berbasis lokasi ini dinilai lebih efektif dibandingkan pendekatan yang bersifat merata, karena gangguan terbukti terkonsentrasi pada titik-titik tertentu dalam sistem transmisi.

Strategi kedua berfokus pada peningkatan kualitas sistem pentanahan (*grounding system*) pada menara-menara transmisi yang tergolong kritis. Berdasarkan mekanisme gangguan yang terjadi, ketidakmampuan sistem dalam menyalurkan arus petir ke tanah dapat menyebabkan kenaikan tegangan pada struktur menara dan memicu terjadinya *back flashover*. Oleh karena itu, diperlukan pengukuran ulang nilai resistansi pentanahan serta perbaikan sistem *grounding* dengan target resistansi yang memenuhi standar operasional (umumnya <5 Ohm). Langkah ini menjadi sangat penting dalam upaya menurunkan probabilitas gangguan akibat sambaran petir.

Strategi ketiga difokuskan pada optimalisasi penggunaan *lightning arrester* di lokasi dengan frekuensi gangguan yang tinggi. Penambahan maupun relokasi *arrester* pada titik-titik kritis dapat meningkatkan kemampuan sistem dalam membatasi tegangan lebih sebelum mencapai peralatan utama. Selain itu, koordinasi proteksi antara *arrester* dan sistem isolasi perlu ditingkatkan agar kinerja sistem menjadi lebih optimal dalam menahan gangguan transien.

Strategi keempat adalah penerapan pemeliharaan berbasis waktu (*temporal based maintenance*). Berdasarkan data, gangguan dominan terjadi pada periode siang hingga sore hari serta pada bulan-bulan tertentu dalam satu tahun. Oleh karena itu, kegiatan inspeksi intensif dan pemantauan sistem sebaiknya difokuskan pada periode tersebut, khususnya menjelang musim hujan. Pendekatan ini memungkinkan sistem berada dalam kondisi optimal pada saat tingkat risiko gangguan mencapai titik tertinggi.

Strategi kelima adalah penerapan pendekatan berbasis *risk score* dalam pengelolaan aset transmisi. Data menunjukkan bahwa tingkat risiko tidak selalu berbanding lurus dengan jumlah gangguan, melainkan dipengaruhi oleh kombinasi parameter seperti intensitas sambaran, lokasi, serta kondisi teknis sistem. Oleh karena itu, penggunaan *risk score* sebagai dasar pengambilan keputusan dapat meningkatkan efektivitas mitigasi secara signifikan, karena mampu mengidentifikasi potensi gangguan sebelum terjadi.

Tabel 4. *Risk Score* Penghantar Transmisi

No	Nama Penghantar	Risk Score
1	TRS 70 kV Cigereleng–Majalaya	5,37
2	TRS 70 kV Ujungberung–Sumedang	4,66
3	TRS 70 kV Cigereleng–Cikalong	4,50

Berdasarkan tabel diatas, terlihat bahwa penghantar dengan *risk score* tertinggi tidak selalu memiliki jumlah gangguan terbanyak, namun menunjukkan potensi risiko yang lebih besar berdasarkan parameter teknis. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan mitigasi tidak cukup hanya didasarkan pada frekuensi gangguan, melainkan perlu mempertimbangkan tingkat risiko sistem secara menyeluruh.

Sebagai tindak lanjut, strategi mitigasi dirumuskan dalam bentuk tabel prioritas tindakan pada tabel berikut:

Tabel 5 Strategi Mitigasi Berbasis Data

No	Lokasi Prioritas	Permasalahan Dominan	Strategi Mitigasi
1	Cigereleng - Cikalong	Gangguan tinggi	Perbaikan grounding & inspeksi isolator
2	Cigereleng - Majalaya	Risk score tinggi	Penambahan lightning arrester
3	Ujungberung - Sumedang	Kerentanan sistem	Monitoring & pemeliharaan intensif

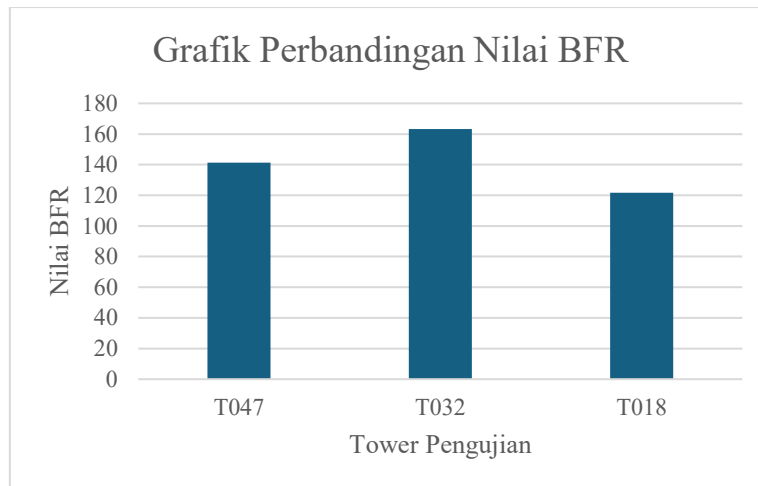
Tabel diatas menunjukkan bahwa strategi mitigasi dirancang secara spesifik sesuai dengan kondisi masing-masing penghantar. Pendekatan ini dinilai lebih efektif dibandingkan pendekatan umum, karena secara langsung menargetkan sumber permasalahan yang telah diidentifikasi melalui analisis data.

Secara keseluruhan, strategi mitigasi yang diusulkan dalam penelitian ini menitikberatkan pada pendekatan spasial (lokasi), temporal (waktu), dan teknis (kondisi sistem). Dengan mengintegrasikan ketiga aspek tersebut, diharapkan sistem transmisi memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi serta mampu mereduksi dampak gangguan akibat sambaran petir secara lebih efektif dan berkelanjutan.

Analisis Hasil Perhitungan BFR, BFOR, SFR, dan SFFOR

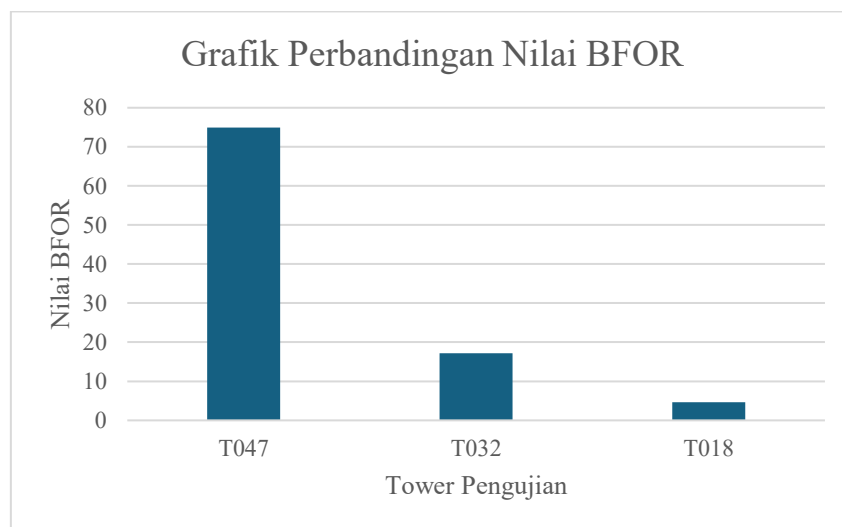
Tabel 6 Rekapitulasi Hasil Simulasi EGM

Tower	BFR	BFOR	SFR	SFFOR
T-047	141,4	74,90	0,331	0,324
T-032	163,3	17,16	0,942	0,933
T-018	121,6	4,64	0,393	0,387



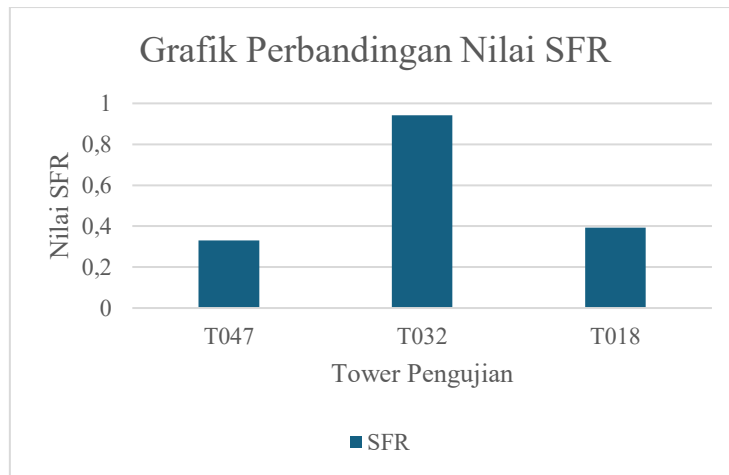
Gambar 4. Perbandingan Nilai BFR

Grafik menunjukkan bahwa Tower T-032 memiliki nilai Back Flashover Rate (BFR) tertinggi sebesar 163,3 gangguan/100 km/tahun, sedangkan Tower T-018 memiliki nilai terendah sebesar 121,6 gangguan/100 km/tahun. Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik geometri saluran dan kondisi sistem pentanahan memengaruhi peluang terjadinya sambaran pada menara. Semakin besar nilai BFR, semakin tinggi frekuensi kejadian *back flashover* secara teoritis sebelum mempertimbangkan probabilitas arus petir yang melebihi arus kritis.



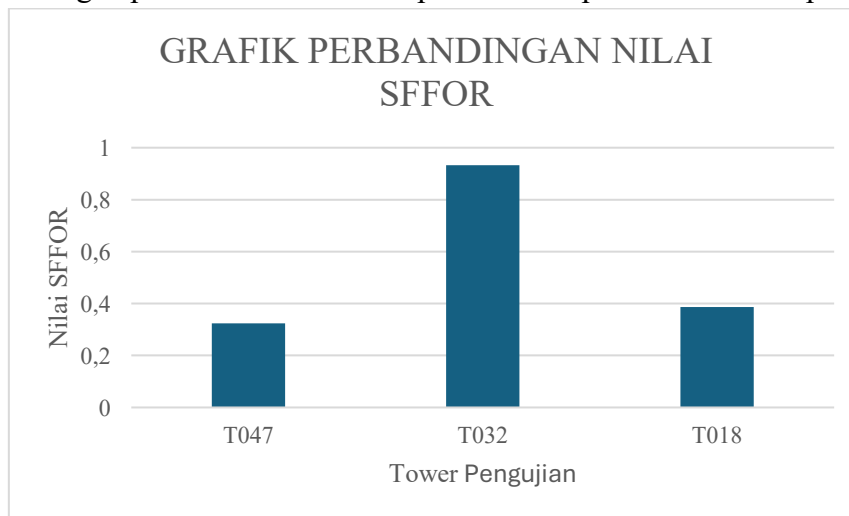
Gambar 5 Perbandingan Nilai BFOR

Grafik menunjukkan penurunan yang signifikan dibandingkan nilai BFR. Penurunan ini disebabkan karena perhitungan BFOR telah mempertimbangkan probabilitas arus petir yang melebihi arus kritis *back flashover*. Tower T-047 tetap menghasilkan nilai BFOR tertinggi, sedangkan Tower T-018 mempunyai nilai paling kecil. Grafik memperlihatkan bahwa nilai BFR meningkat pada tower dengan karakteristik pentanahan yang kurang baik. Hal tersebut menunjukkan bahwa kualitas sistem pentanahan berpengaruh langsung terhadap peluang terjadinya gangguan akibat petir.



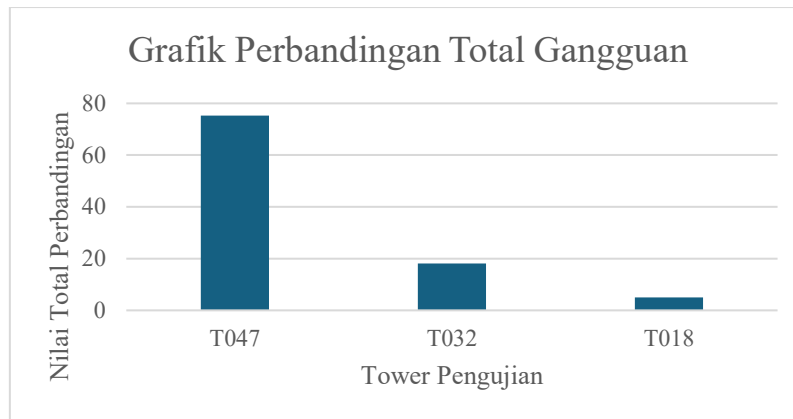
Gambar 6 Perbandingan Nilai *Shielding Failure Rate* (SFR) pada Tower T018, T032 dan T047

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh bahwa Tower T047 memiliki nilai SFR tertinggi dibandingkan Tower T032 dan Tower T018. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi geometris tower tersebut memiliki peluang lebih besar mengalami kegagalan perlindungan kawat tanah (*shielding failure*). Nilai BFOR merupakan parameter yang paling menentukan tingkat keandalan saluran transmisi. Tower T-047 menunjukkan nilai tertinggi sehingga menjadi lokasi dengan prioritas utama dalam pelaksanaan perbaikan sistem pentanahan.



Gambar 7 Perbandingan Nilai *Shielding Failure Flashover Outage Rate* (SFFOR) pada Tower T018, T032 dan T047

Nilai SFFOR menunjukkan jumlah gangguan *shielding failure* yang benar-benar berkembang menjadi *flashover*. Grafik menunjukkan bahwa nilai SFFOR lebih kecil dibandingkan parameter BFOR. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar gangguan akibat petir tidak disebabkan oleh kegagalan sistem *shielding*, tetapi oleh mekanisme *back flashover*.



Gambar 8 Perbandingan Total Gangguan

Grafik total gangguan memberikan gambaran tingkat kerawanan masing-masing tower terhadap gangguan akibat sambaran petir. Tower T-047 menunjukkan nilai total gangguan tertinggi sebesar 75,22 gangguan/100 km/tahun, diikuti Tower T-032 sebesar 18,09 gangguan/100 km/tahun, sedangkan Tower T-018 memiliki nilai terendah sebesar 5,03 gangguan/100 km/tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa Tower T-047 merupakan lokasi yang paling kritis sehingga perlu menjadi prioritas dalam program mitigasi gangguan akibat petir.

Analisis Hasil Simulasi EGM

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode *Electro-Geometric Model* (EGM), terlihat bahwa mekanisme gangguan akibat sambaran petir pada ketiga tower tidak memiliki karakteristik yang sama. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh konfigurasi geometri tower, posisi kawat tanah, karakteristik isolasi, dan sistem pentanahan yang berbeda pada setiap lokasi.

Dari hasil simulasi diperoleh bahwa mekanisme *back flashover* merupakan penyebab dominan gangguan pada seluruh tower, yang ditunjukkan oleh nilai BFOR yang jauh lebih besar dibandingkan SFFOR. Kondisi ini menunjukkan bahwa kenaikan potensial menara akibat sambaran petir memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap terjadinya gangguan dibandingkan kegagalan perlindungan kawat tanah (*shielding failure*).

Tower T-047 memiliki nilai BFOR tertinggi sebesar 74,90 gangguan/100 km/tahun, sehingga menjadi tower dengan tingkat kerawanan paling tinggi terhadap gangguan akibat petir. Sebaliknya, Tower T-018 memiliki nilai BFOR paling rendah sebesar 4,64 gangguan/100 km/tahun, yang menunjukkan bahwa konfigurasi geometri dan karakteristik pentanahan pada tower tersebut memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap mekanisme *back flashover*.

Pada mekanisme *shielding failure*, Tower T-032 memiliki nilai SFR dan SFFOR tertinggi, masing-masing sebesar 0,942 dan 0,933 gangguan/100 km/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa peluang sambaran langsung ke penghantar pada Tower T-032 lebih besar dibandingkan dua tower lainnya. Meskipun demikian, nilai tersebut masih jauh lebih kecil dibandingkan nilai BFOR, sehingga mekanisme *back flashover* tetap menjadi penyebab utama gangguan pada lokasi penelitian.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa efektivitas sistem proteksi petir pada saluran transmisi tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan kawat tanah, tetapi juga oleh kualitas sistem pentanahan menara dan koordinasi isolasi. Oleh karena itu, peningkatan kualitas pentanahan menjadi langkah mitigasi yang lebih efektif dibandingkan hanya melakukan perubahan konfigurasi kawat tanah.

Analisis Kondisi Sistem Pentanahan Tower

Sistem pentanahan merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan tingkat kerawanan saluran transmisi terhadap mekanisme *back flashover*. Pada saat terjadi sambaran petir pada menara atau kawat tanah, arus petir akan dialirkan menuju tanah melalui sistem pentanahan tower. Nilai tahanan pentanahan yang tinggi menyebabkan kenaikan potensial menara (*tower potential rise*) menjadi lebih besar sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya *flashover* pada isolator.

Berdasarkan data eksisting yang diperoleh pada tiga tower representatif, nilai tahanan pentanahan menunjukkan kondisi yang berbeda sebagaimana ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 7 Kondisi Eksisting Sistem Pentanahan Tower

Tower	Saluran	Tahanan Eksisting (Ω)	Pentanahan Batas Standar	Status
T-018	SUTT 70 kV UBRNG-SMDNG	1,69	≤ 5	Memenuhi
T-032	SUTT 70 kV CGRLG-MJLYA	4,17	≤ 5	Memenuhi
T-047	SUTT 70 kV CGRLG-CKLNG	67,20	≤ 5	Tidak memenuhi

Berdasarkan tabel tersebut, Tower T-018 memiliki nilai tahanan pentanahan sebesar 1,69 Ω , sehingga berada jauh di bawah batas maksimum 5 Ω . Tower T-032 memiliki nilai tahanan sebesar 4,17 Ω dan masih memenuhi batas yang dipersyaratkan. Sementara itu, Tower T-047 memiliki nilai tahanan pentanahan sebesar 67,20 Ω , sehingga secara signifikan melebihi batas maksimum 5 Ω .

Kondisi T-047 menunjukkan adanya permasalahan serius pada sistem pentanahan. Nilai 67,20 Ω merupakan sekitar 13,44 kali batas maksimum 5 Ω . Dengan demikian, T-047 memiliki kondisi pentanahan yang jauh lebih buruk dibandingkan T-018 dan T-032 serta menjadi tower yang paling membutuhkan tindakan perbaikan.

Analisis Pengaruh Karakteristik Menara

Hasil simulasi menunjukkan bahwa karakteristik menara memberikan pengaruh terhadap besarnya gangguan akibat sambaran petir. Hal tersebut terlihat dari perbedaan nilai BFR, BFOR, SFR, dan SFFOR pada T-047, T-032, dan T-018. Parameter yang membedakan tingkat kerawanan meliputi konfigurasi geometri tower, posisi kawat tanah, karakteristik isolasi, serta sistem pentanahan.

T-032 memiliki BFR tertinggi sebesar 163,3 gangguan/100 km/tahun, tetapi BFOR-nya sebesar 17,16 gangguan/100 km/tahun, lebih rendah daripada T-047 yang memiliki BFR 141,4 namun BFOR 74,90 gangguan/100 km/tahun. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa BFR tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator tingkat gangguan aktual. BFOR lebih representatif untuk menentukan prioritas mitigasi karena telah mempertimbangkan probabilitas terjadinya gangguan berdasarkan kondisi arus kritis.

T-047 menjadi tower paling kritis karena menghasilkan BFOR dan total gangguan tertinggi. Sebaliknya, T-018 memiliki BFOR dan total gangguan terendah. Sementara itu, T-032 memerlukan perhatian khusus pada aspek *shielding* karena memiliki SFR dan SFFOR tertinggi. Dengan demikian, strategi mitigasi tidak dapat diseragamkan untuk seluruh tower, tetapi harus disesuaikan dengan karakteristik dan mekanisme gangguan dominan pada masing-masing tower.

Pengaruh Sistem Pentanahan terhadap Dominasi *Back Flashover*

Perbedaan kondisi pentanahan tersebut memberikan penjelasan penting terhadap hasil simulasi *Electro-Geometric Model* (EGM). Hasil simulasi menunjukkan bahwa T-047 memiliki BFOR sebesar 74,90 gangguan/100 km/tahun, sedangkan T-032 sebesar 17,16 gangguan/100 km/tahun dan T-018 sebesar 4,64 gangguan/100 km/tahun.

Jika dibandingkan dengan kondisi pentanahan eksisting, terlihat kecenderungan bahwa tower dengan tahanan pentanahan yang lebih tinggi memiliki tingkat kerawanan *back flashover* yang lebih besar. T-047 memiliki tahanan pentanahan tertinggi, yaitu 67,20 Ω , dan sekaligus menghasilkan BFOR tertinggi sebesar 74,90 gangguan/100 km/tahun. Sebaliknya, T-018 memiliki tahanan pentanahan terendah sebesar 1,69 Ω dan BFOR terendah sebesar 4,64 gangguan/100 km/tahun.

Tabel 8 Hubungan Pentanahan dengan BFOR

Tower	R Pentanahan (Ω)	BFR (gangguan/100 km/tahun)	BFOR (gangguan/100 km/tahun)	Keterangan
T-018	1,69	121,6	4,64	Pentanahan baik
T-032	4,17	163,3	17,16	Mendekati batas maksimum
T-047	67,20	141,4	74,90	Pentanahan sangat buruk

Hasil tersebut memperkuat bahwa BFOR tidak hanya ditentukan oleh besar kecilnya BFR, tetapi juga oleh kondisi sistem pentanahan dan parameter lain yang menentukan kemampuan isolasi terhadap tegangan lebih akibat sambaran petir. Hal tersebut terlihat pada T-032 yang memiliki BFR paling tinggi (163,3) tetapi BFOR-nya (17,16) lebih rendah daripada T-047 yang memiliki BFR 141,4 dan BFOR 74,90. Dengan demikian, BFOR menjadi parameter yang lebih tepat digunakan untuk menentukan prioritas mitigasi gangguan, karena menggambarkan kemungkinan gangguan aktual setelah mempertimbangkan kondisi sistem.

Evaluasi terhadap Standar Pentanahan

Berdasarkan ketentuan PT PLN (Persero) yang digunakan dalam penelitian ini, batas tahanan pentanahan untuk tower SUTT 70 kV adalah $\leq 5 \Omega$.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa:

1. T-018 = 1,69 Ω , memenuhi standar dengan margin 3,31 Ω .
2. T-032 = 4,17 Ω , memenuhi standar dengan margin 0,83 Ω .
3. T-047 = 67,20 Ω , tidak memenuhi standar dan memerlukan perbaikan.

Secara relatif terhadap batas 5 Ω , nilai T-018 hanya sekitar 33,8% dari batas maksimum, sedangkan T-032 mencapai 83,4% dari batas maksimum. T-047 mencapai 1.344% dari batas maksimum. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa T-047 merupakan kondisi paling kritis dari sisi pentanahan. Nilai tahanan pentanahan yang sangat tinggi dapat meningkatkan kenaikan potensial menara ketika arus petir mengalir menuju tanah dan pada akhirnya meningkatkan risiko terjadinya *back flashover*.

Implikasi terhadap Strategi Mitigasi

Tabel 9 Prioritas Mitigasi Berdasarkan Hasil Simulasi EGM

Prioritas	Tower	BFOR (gangguan/100 km/tahun)	SFR (gangguan/100 km/tahun)	Total Gangguan	Strategi Mitigasi
1	T-047	74,90	0,331	75,22	Perbaikan grounding dengan target $< 5 \Omega$, inspeksi sistem pentanahan, evaluasi isolasi

2	T-032	17,16	0,942	18,09	Perbaikan grounding dan evaluasi konfigurasi <i>shield wire</i>
3	T-018	4,64	0,393	5,03	Pemeliharaan kondisi eksisting dan inspeksi berkala

Hasil simulasi EGM menunjukkan bahwa tingkat kerawanan ketiga tower berbeda secara signifikan. Tower T-047 memiliki total gangguan sebesar 75,22 gangguan/100 km/tahun, diikuti T-032 sebesar 18,09 gangguan/100 km/tahun, sedangkan T-018 sebesar 5,03 gangguan/100 km/tahun. Berdasarkan tingkat kerawanan tersebut, T-047 menjadi prioritas utama mitigasi, diikuti T-032 dan T-018.

Pada T-047, nilai BFOR sebesar 74,90 gangguan/100 km/tahun menunjukkan bahwa mekanisme *back flashover* menjadi perhatian utama. Oleh karena itu, tindakan mitigasi difokuskan pada peningkatan kualitas sistem pentanahan, pengukuran ulang tahanan pentanahan, pemeriksaan sambungan konduktor grounding, dan perbaikan sistem grounding dengan target tahanan $<5 \Omega$. Target tersebut digunakan sebagai batas operasional dalam rekomendasi mitigasi dan bukan sebagai hasil pengukuran setelah perbaikan. Pada T-032, nilai BFR sebesar 163,3 gangguan/100 km/tahun merupakan yang tertinggi, sedangkan nilai SFR dan SFFOR masing-masing sebesar 0,942 dan 0,933 gangguan/100 km/tahun juga merupakan yang tertinggi. Kondisi ini menunjukkan perlunya kombinasi perbaikan grounding dan evaluasi konfigurasi *shield wire*. Pada T-018, nilai BFOR sebesar 4,64 gangguan/100 km/tahun merupakan yang terendah di antara ketiga tower. Oleh karena itu, tindakan mitigasi difokuskan pada mempertahankan kondisi sistem melalui inspeksi dan pemeliharaan berkala.

Analisis Klasifikasi Jenis Gangguan Transmisi Akibat Sambaran Petir

Berdasarkan hasil analisis data historis gangguan transmisi UPT Bandung periode 2021 - 2025, diketahui bahwa petir merupakan penyebab dominan dengan kontribusi sebanyak 90 kejadian dari total 210 gangguan. Namun demikian, data operasional yang tersedia tidak secara langsung mengelompokkan jenis gangguan ke dalam kategori teknis seperti *flashover* atau *back flashover*. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan klasifikasi berbasis mekanisme gangguan dalam sistem tenaga listrik, yang mengacu pada teori serta karakteristik gangguan akibat sambaran petir.

Tabel 10 Klasifikasi Mekanisme Gangguan Akibat Petir

No	Jenis Gangguan	Mekanisme Fisik Dominan	Keterkaitan dengan Data UPT
1	Flashover	Kegagalan isolasi akibat tegangan lebih	Petir dominan → overvoltage tinggi
2	Back Flashover	Kenaikan potensial tower akibat grounding buruk	Gangguan terkonsentrasi pada line tertentu
3	Hubung Singkat	Lanjutan dari kegagalan isolasi	Terjadi setelah flashover
4	Trip Sistem Proteksi	Respon relay terhadap arus gangguan	Semua gangguan berujung trip
5	Overvoltage	Tegangan lebih akibat sambaran petir	Penyebab utama seluruh gangguan

Berdasarkan tabel diatas, dapat dijelaskan bahwa fenomena gangguan akibat petir tidak terjadi secara langsung dalam satu tahap, melainkan melalui rangkaian mekanisme yang saling berkaitan. Proses gangguan diawali oleh munculnya tegangan lebih (*overvoltage*) akibat sambaran petir, yang selanjutnya dapat memicu kegagalan isolasi dalam bentuk *flashover*. Pada kondisi tertentu, terutama ketika sistem pentanahan tidak berfungsi secara optimal, arus petir tidak dapat dialirkan ke tanah dengan baik, sehingga berpotensi menimbulkan *back flashover*.

Selanjutnya, kegagalan isolasi tersebut dapat berkembang menjadi gangguan hubung singkat, yang menyebabkan arus gangguan mengalir dalam sistem. Kondisi ini kemudian

dideteksi oleh sistem proteksi, sehingga relay bekerja dan memutus aliran listrik untuk mencegah kerusakan yang lebih luas. Dengan demikian, trip sistem proteksi merupakan tahap akhir dari rangkaian gangguan, bukan penyebab utama.

Untuk memperkuat keterkaitan antara data dan mekanisme gangguan, disusun tabel hubungan interpretatif sebagai berikut.

Tabel 11 Hubungan Data Historis UPT dengan Mekanisme Gangguan

Parameter Data UPT	Interpretasi Teknis
Petir sebagai penyebab dominan	Overvoltage menjadi pemicu utama gangguan
Gangguan terkonsentrasi pada line tertentu	Indikasi masalah grounding atau isolasi
Rasio gangguan tinggi (2025)	Penurunan performa sistem proteksi
Gangguan dominan siang-sore	Aktivitas petir tinggi akibat konveksi atmosfer
Musim hujan → gangguan meningkat	Intensitas sambaran meningkat

Berdasarkan tabel diatas, terlihat bahwa data historis tidak hanya merepresentasikan jumlah gangguan, tetapi juga memberikan indikasi yang kuat mengenai mekanisme yang terjadi dalam sistem transmisi. Sebagai contoh, tingginya rasio gangguan pada tahun 2025 menunjukkan bahwa sistem kurang mampu meredam dampak sambaran petir secara efektif, yang dapat dikaitkan dengan penurunan kinerja sistem proteksi, seperti *grounding* maupun *lightning arrester*.

Selain itu, distribusi gangguan yang terkonsentrasi pada penghantar tertentu menunjukkan bahwa faktor lokal seperti kondisi tanah, konfigurasi jaringan, dan kualitas peralatan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap terjadinya gangguan. Hal ini menegaskan bahwa klasifikasi gangguan tidak dapat dilakukan secara umum, melainkan harus mempertimbangkan kondisi spesifik pada sistem transmisi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis statistik dan simulasi menggunakan metode *Electro-Geometric Model* (EGM) terhadap saluran transmisi 150 kV PT PLN (Persero) UPT Bandung periode 2021–2025, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut. Hubungan antara intensitas sambaran petir dan gangguan transmisi berada pada kategori sedang, yang menunjukkan bahwa jumlah gangguan tidak hanya dipengaruhi oleh frekuensi sambaran petir, tetapi juga oleh karakteristik sistem proteksi petir, kondisi sistem pentanahan, karakteristik isolasi, dan konfigurasi saluran transmisi. Hasil simulasi *Electro-Geometric Model* (EGM) pada Tower T-018, T-032, dan T-047 menunjukkan bahwa mekanisme back flashover merupakan penyebab utama gangguan akibat sambaran petir. Berdasarkan data gangguan selama periode penelitian, gangguan akibat *back flashover* mencapai 71 kejadian (78,89%), sedangkan *shielding failure* hanya 6 kejadian (6,67%) dari total 90 gangguan akibat petir. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai *Back Flashover Outage Rate* (BFOR) lebih dominan dibandingkan *Shielding Failure Flashover Outage Rate* (SFFOR). Tower T-047 memiliki tingkat kerentanan tertinggi terhadap gangguan akibat sambaran petir, yang ditunjukkan oleh nilai BFOR terbesar dibandingkan Tower T-018 dan Tower T-032. Kondisi ini menunjukkan bahwa karakteristik menara dan kualitas sistem pentanahan berpengaruh terhadap besarnya kemungkinan terjadinya gangguan akibat mekanisme *back flashover*. Strategi mitigasi yang paling efektif untuk meningkatkan keandalan saluran transmisi adalah peningkatan kualitas sistem pentanahan, karena mekanisme *back flashover* lebih dominan dibandingkan *shielding failure*. Selain itu, evaluasi konfigurasi kawat tanah, inspeksi berkala terhadap sistem

pentanahan, dan pemeliharaan sistem proteksi petir perlu dilakukan secara berkelanjutan untuk mengurangi gangguan akibat sambaran petir.

REFERENSI

- Akisa, R. A. (2023). Peningkatan efisiensi SEPIC converter dengan MPPT incremental conductance pada panel surya. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 11(1), 73–80. <https://doi.org/10.32487/jtt.v11i1.1602>
- AlZubaidi, A. A. H., Khaliq, L. A., Hamad, H. S., Al-Azzawi, W. K., Jabbar, M. S., & Shihab, T. A. (2022). MPPT implementation and simulation using developed P&O algorithm for photovoltaic system concerning efficiency. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(5), 2460–2470. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i5.3949>
- Chatzigeorgiou, N. G., Theocharides, S., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2023). Evaluating the techno-economic effect of pricing and consumption parameters on the power-to-energy ratio for sizing photovoltaic-battery systems: An assessment of prosumers in the Mediterranean area. *Energies*, 16(10), 4073. <https://doi.org/10.3390/en16104073>
- Ciocia, A., Amato, A., Di Leo, P., Fichera, S., Malgaroli, G., Spertino, F., & Tzanova, S. (2021). Self-consumption and self-sufficiency in photovoltaic systems: Effect of grid limitation and storage installation. *Energies*, 14(6), 1591. <https://doi.org/10.3390/en14061591>
- Harahap, B. I., Refly, S., Bonardo, D., Bavitra, B., & Wanatirta, B. A. (2026). Comparative study of 10 Wp solar panel performance with mirror reflectors at various angles. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 14(1), 84–95. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v14i1.84>
- Hassan, Q., Pawela, B., Hasan, A., & Jaszczur, M. (2022). Optimization of large-scale battery storage capacity in conjunction with photovoltaic systems for maximum self-sustainability. *Energies*, 15(10), 3845. <https://doi.org/10.3390/en15103845>
- Ibrahim, M. H., Ang, S. P., Dani, M. N., Rahman, M. I., Petra, R., & Sulthan, S. M. (2023). Optimizing step-size of perturb & observe and incremental conductance MPPT techniques using PSO for grid-tied PV system. *IEEE Access*, 11, 13079–13090. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3242979>
- Karalus, S., Köpfer, B., Guthke, P., Killinger, S., & Lorenz, E. (2023). Analysing grid-level effects of photovoltaic self-consumption using a stochastic bottom-up model of prosumer systems. *Energies*, 16(7), 3059. <https://doi.org/10.3390/en16073059>
- Khodair, D., Motahhir, S., Mostafa, H. H., Shaker, A., Munim, H. A. E., Abouelatta, M., & Saeed, A. (2023). Modeling and simulation of modified MPPT techniques under varying operating climatic conditions. *Energies*, 16(1), 549. <https://doi.org/10.3390/en16010549>
- Korab, R., Połomski, M., & Naczyński, T. (2024). Optimal scheduling of energy storage and shiftable loads in grid-connected residential buildings with photovoltaic micro-installations. *Energies*, 17(21), 5264. <https://doi.org/10.3390/en17215264>
- Nguyen, H. M., Miyazaki, T., Sugaya, Y., & Omachi, S. (2021). Multiple visual-semantic embedding for video retrieval from query sentence. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(7), 3214. <https://doi.org/10.3390/app11073214>
- Norouzi, F., Shekhar, A., Hoppe, T., & Bauer, P. (2025). Analysing the impact of the different pricing policies on PV-battery systems: A Dutch case study of a residential microgrid. *Energy Policy*, 204, Article 114620. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114620>
- Pervez, I., Antoniadis, C., & Massoud, Y. (2022). Advanced limited search strategy for enhancing the performance of MPPT algorithms. *Energies*, 15(15), 5650. <https://doi.org/10.3390/en15155650>

- Ramírez Torres, J. A., Lastres Danguillecourt, O., González Domínguez, R. A., Ibáñez Duharte, G. R., Vereá Valladares, L. E., Pantoja Enríquez, J., Enríquez Santiago, J. A., López López, A., & Verde Añorve, A. (2025). Development and implementation of the MPPT based on incremental conductance for voltage and frequency control in single-stage DC-AC converters. *Energies*, 18(1), 184. <https://doi.org/10.3390/en18010184>
- Refly, S., Harahap, B. I., Wanatirta, B. A., Harahap, R. K., & Bonardo, D. (2025). Performance comparison of polycrystalline solar cells with and without reflectors. *Jurnal Teknik Elektro*, 17(1), 31–36. <https://doi.org/10.15294/jte.v17i1.34337>
- Rollo, A., Serafini, P., Aleotti, F., Cilio, D., Morandini, E., Moneta, D., Rossi, M., Zulianello, M., & Angelucci, V. (2025). Load shifting and demand-side management in renewable energy communities: Simulations of different technological configurations. *Energies*, 18(4), 872. <https://doi.org/10.3390/en18040872>
- Sun, C., Ling, J., & Wang, J. (2022). Research on a novel and improved incremental conductance method. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20133-7>
- Utomo, S. B., Setiawan, I., Fajar, B., Winoto, S. H., & Marwanto, A. (2022). Optimizing of the installed capacity of hybrid renewable energy with a modified MPPT model. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(1), 73–81. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp73-81>
- Voinov, P., Huber, P., Calatroni, A., Rumsch, A., & Paice, A. (2020). Effect of sampling rate on photovoltaic self-consumption in load shifting simulations. *Energies*, 13(20), 5393. <https://doi.org/10.3390/en13205393>
- Zand, S. J., Hsia, K. H., Eskandarian, N., & Mobayen, S. (2021). Improvement of self-predictive incremental conductance algorithm with the ability to detect dynamic conditions. *Energies*, 14(5), 1234. <https://doi.org/10.3390/en14051234>