



Analisis Pengaruh Sistem Pentanahan Tower dan Sambaran Petir Terhadap Gangguan serta Evaluasi Efektivitas Metode Perbaikan Pentanahan pada SUTT 150 kV

Wyananda Fiqi Fadlan Adhima*, Rummi Sirait

Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta Selatan, Indonesia

Email: ^{1,*} wyanandafiqi@gmail.com, ² rummi@itpln.ac.id

Email Penulis Korespondensi: wyanandafiqi@gmail.com

Abstrak—Tingginya aktivitas sambaran petir di Indonesia berpotensi menurunkan keandalan sistem transmisi. Berdasarkan data operasional, SUTT 150 kV Tanjung Jati–Sayung merupakan saluran transmisi dengan jumlah gangguan akibat petir tertinggi di wilayah UPT Semarang pada periode 2021–2025, sehingga menjadi objek yang relevan untuk dianalisis lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara jumlah sambaran petir dan nilai tahanan pentanahan terhadap gangguan sistem, serta mengevaluasi efektivitas metode perbaikan sistem pentanahan yang telah diterapkan. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis deskriptif, korelasi Pearson, dan regresi linier sederhana menggunakan data sambaran petir, nilai tahanan pentanahan tower, dan data gangguan sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa jumlah sambaran petir memiliki hubungan positif dengan gangguan sistem dengan koefisien korelasi sebesar 0,137 dan p-value 0,0452, sedangkan nilai tahanan pentanahan memiliki hubungan positif dengan gangguan sistem dengan koefisien korelasi sebesar 0,2133 dan p-value 0,0017. Walaupun hubungan tersebut signifikan secara statistik, nilai koefisien determinasi yang relatif rendah ($R^2 < 5\%$) menunjukkan bahwa kedua variabel hanya menjelaskan sebagian kecil variasi gangguan akibat petir yang terjadi, sehingga masih terdapat faktor-faktor lain yang berkontribusi terhadap kejadian gangguan pada saluran transmisi. Meskipun demikian, perbaikan sistem pentanahan tetap menjadi salah satu upaya teknis yang dapat dioptimalkan untuk menurunkan risiko gangguan. Hasil evaluasi metode perbaikan menunjukkan bahwa tower dengan metode Multi Rod Grounding (MRG) memiliki probabilitas gangguan paling rendah dibandingkan metode lain yang diamati dalam penelitian ini. Temuan penelitian ini memberikan gambaran empiris mengenai hubungan antara frekuensi sambaran petir, tahanan pentanahan tower, dan gangguan sistem transmisi, serta dapat menjadi masukan dalam evaluasi strategi pemeliharaan sistem pentanahan untuk meningkatkan keandalan operasi jaringan transmisi.

Kata Kunci: Gangguan Transmisi; Pentanahan Tower; Sambaran Petir; Sistem Transmisi; Analisis Statistik

Abstract—The high frequency of lightning activity in Indonesia poses a significant threat to the reliability of power transmission systems. Based on operational data, the 150 kV Tanjung Jati–Sayung transmission line recorded the highest number of lightning-induced disturbances within the Semarang Transmission Maintenance Unit (UPT Semarang) during the 2021–2025 period, making it a relevant subject for further investigation. This study aims to analyze the relationship between lightning strike frequency, tower grounding resistance, and transmission system disturbances, as well as to evaluate the effectiveness of grounding system improvement methods that have been implemented. A quantitative approach was employed using descriptive analysis, Pearson correlation, and simple linear regression based on lightning strike data, tower grounding resistance measurements, and disturbance records. The results indicate that lightning strike frequency has a positive relationship with transmission system disturbances, with a correlation coefficient of 0.137 and a p-value of 0.0452. Similarly, tower grounding resistance exhibits a positive relationship with system disturbances, with a correlation coefficient of 0.2133 and a p-value of 0.0017. Although these relationships are statistically significant, the relatively low coefficient of determination ($R^2 < 5\%$) suggests that both variables explain only a small portion of the variation in lightning-related disturbances, indicating the presence of other contributing factors that were not included in this study. Nevertheless, grounding system improvement remains one of the technical measures that can be optimized to reduce the risk of transmission line disturbances. The evaluation results show that towers employing the Multi Rod Grounding (MRG) method exhibited the lowest disturbance probability among the grounding improvement methods observed in this study. Overall, the findings provide empirical insights into the relationship between lightning strike frequency, tower grounding resistance, and transmission system disturbances, and may serve as a useful reference for developing maintenance strategies aimed at improving transmission system reliability.

Keywords: Grounding System; Lightning Strikes; Statistical Analysis; Transmission Faults; Transmission System

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu dari beberapa negara yang memiliki tingkat kepadatan sambaran petir tertinggi di dunia. Kondisi ini dikarenakan letak geografis Indonesia yang berada di sekitar garis khatulistiwa serta dikelilingi oleh wilayah perairan yang luas sehingga memiliki iklim tropis dengan tingkat pembentukan awan konvektif yang tinggi. Awan konvektif tersebut menjadi media terjadinya pemisahan muatan listrik yang dapat memicu terjadinya sambaran petir (Cooray, 2014; Rakov & Uman, 2003; Shariatinasab et al., 2020).

Proses terjadinya petir diawali oleh pembentukan saluran muatan yang disebut *leader* yang merambat secara bertahap dari awan menuju permukaan bumi akibat perbedaan potensial listrik yang tinggi antara awan dan tanah. Saluran ini bergerak secara tidak beraturan membentuk lintasan bercabang dan zig-zag. Ketika *leader* mendekati permukaan bumi, medan listrik yang kuat akan memicu terbentuknya *upward streamer* dari objek-objek di permukaan seperti bangunan tinggi, menara, dan struktur konduktif lainnya. Pertemuan antara *downward leader* dan *upward streamer* menghasilkan kanal konduktif yang memungkinkan terjadinya loncatan arus besar yang dikenal sebagai *return stroke* atau sambaran petir. Objek dengan ketinggian lebih besar dibandingkan lingkungan sekitarnya memiliki



probabilitas lebih tinggi untuk tersambar petir karena jumlah medan listrik di sekitarnya lebih besar (Cooray, 2014; Heidler & Paul, 2021).

Tower transmisi pada Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) maupun Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) adalah struktur baja yang berfungsi menopang dan merentangkan konduktor agar berada pada jarak dan ketinggian yang aman terhadap manusia dan lingkungan (Glover et al., 2011). Berdasarkan Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi Nomor 01.P/47/MPE/1992, SUTT didefinisikan sebagai saluran tenaga listrik dengan tegangan di atas 35 kV sampai dengan 245 kV, sedangkan SUTET merupakan saluran tenaga listrik dengan tegangan lebih dari 245 kV.

Dalam sistem ketenagalistrikan khususnya pada bidang transmisi, tower berfungsi sebagai elemen mekanis sekaligus bagian dari sistem proteksi terhadap gangguan petir. Namun, karena ketinggiannya yang relatif lebih besar dibandingkan bangunan di sekitarnya, tower transmisi menjadi salah satu objek yang paling rentan terhadap sambaran petir, baik itu sambaran petir secara langsung maupun tidak langsung (Anderson, 1982).

Gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir menjadi salah satu faktor dominan yang memicu terjadinya gangguan pada sistem transmisi tenaga listrik. Pada saluran transmisi, sambaran petir tidak langsung dapat menimbulkan tegangan induksi yang menyebabkan terjadinya tegangan lebih (*overvoltage*), sehingga berpotensi merusak isolator dan peralatan listrik lainnya. Gangguan ini dapat memicu terjadinya *flashover* pada isolator dan berujung pada pemadaman sistem transmisi yang berdampak pada menurunnya keandalan sistem tenaga listrik (Ishimoto et al., 2022; Kundur et al., 1994).

Untuk menjaga keandalan sistem transmisi, diperlukan sistem proteksi yang mampu meminimalisir dampak sambaran petir, salah satunya melalui penerapan sistem pentanahan (*grounding system*) pada tower transmisi. Sistem pentanahan berfungsi sebagai jalur pengaliran arus gangguan menuju tanah sehingga energi sambaran petir tidak merusak peralatan listrik dan struktur tower (IEEE Std 80-2013, 2013). Kinerja sistem pentanahan sangat dipengaruhi oleh konfigurasi elektroda, resistivitas tanah, serta karakteristik impedansi impuls terhadap arus petir (Grcev et al., 2021; Huang et al., 2021).

Sistem pentanahan pada tower transmisi terdiri dari konduktor pembumian yang terhubung dengan elektroda pentanahan seperti batang (*rod grounding*) atau pelat logam yang ditanam di dalam tanah di sekitar pondasi tower. Sistem ini bertujuan untuk menurunkan tahanan pentanahan sehingga arus petir dapat dialirkan secara efektif ke tanah. Nilai tahanan pentanahan yang tinggi dapat menyebabkan kenaikan tegangan pada struktur tower saat arus petir mengalir ke tanah sehingga meningkatkan risiko terjadinya *back flashover* pada isolator. *Back flashover* merupakan kondisi ketika arus petir tidak dapat dialirkan secara optimal ke tanah akibat sistem pentanahan yang tidak bekerja dengan baik sehingga terjadi loncatan listrik balik pada rangkaian isolator (Rakov & Uman, 2003; Xue et al., 2022). Namun demikian, beberapa penelitian menunjukkan bahwa gangguan tidak selalu terjadi pada kondisi tahanan pentanahan yang tinggi saja, melainkan dipengaruhi oleh interaksi berbagai faktor seperti karakteristik arus petir, kondisi tanah, dan konfigurasi sistem transmisi (Nasir et al., 2021; Shariatinasab et al., 2020).

Pada wilayah kerja PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Semarang, salah satu saluran yang rentan terhadap sambaran petir adalah SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung yang merupakan tanggung jawab operasional dari Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) Kudus. Saluran transmisi ini menghubungkan Gardu Induk (GI) 150 kV Tanjung Jati dengan Gardu Induk (GI) 150 kV Sayung melalui jaringan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Tanjung Jati–Sayung. Saluran ini terdiri atas 214 tower dengan panjang penghantar mencapai 68,786 km. Jenis konduktor yang digunakan adalah $2 \times$ TACSR 520, yang memiliki Kemampuan Hantar Arus (KHA) sebesar 2608 A. Infrastruktur transmisi ini mulai beroperasi pada tahun 2019 untuk mendukung keandalan penyaluran tenaga listrik pada sistem jaringan terkait.

Secara geografis, SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung melintasi wilayah pesisir utara Kabupaten Jepara, kawasan kaki Gunung Muria, serta area persawahan di Kabupaten Demak. Daerah-daerah tersebut memiliki tingkat aktivitas petir yang tinggi, yang berdampak pada meningkatnya peluang terjadinya gangguan pada sistem transmisi akibat sambaran petir (BMKG, 2020). Berdasarkan data gangguan PT PLN (Persero) ULTG Kudus selama periode 1 Januari 2021 hingga 28 Februari 2026, tercatat sebanyak 19 gangguan akibat sambaran petir pada SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung. Dari data pengukuran tahanan pentanahan menunjukkan bahwa beberapa tower yang mengalami gangguan memiliki nilai tahanan pentanahan melebihi standar yang ditetapkan PT PLN (Persero) berdasarkan SK Direksi Nomor 520.K/DIR/2014, yaitu maksimum 10ohm untuk sistem 150 kV. Namun, terdapat pula tower dengan nilai tahanan pentanahan yang memenuhi standar tetapi tetap mengalami gangguan akibat sambaran petir. Hal ini menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan bukan satu-satunya faktor yang menentukan terjadinya gangguan, melainkan terdapat faktor lain yang berinteraksi secara simultan dalam sistem (Chen et al., 2026).

Sebagai upaya mitigasi gangguan petir, PT PLN (Persero) ULTG Kudus telah melakukan berbagai metode perbaikan sistem pentanahan tower, antara lain menggunakan metode *multi rod grounding* (MRG), *multi direct grounding* (MDG), serta penyempurnaan sistem pentanahan tower (PSPT). Masing-masing metode memiliki karakteristik dalam meningkatkan kemampuan disipasi arus petir ke tanah (Ghani & Hapsari, 2025; Kumar et al., 2023; Warmi et al., 2023). Namun demikian, hingga saat ini belum dilakukan evaluasi komprehensif terhadap efektivitas masing-masing metode perbaikan tersebut. Beberapa tower yang telah mengalami perbaikan sistem pentanahan masih mengalami gangguan ulang akibat sambaran petir, sehingga dilakukan perubahan dan penambahan metode sistem pentanahan tower berulang yang berdampak pada meningkatnya biaya pemeliharaan.



Beberapa penelitian terdahulu telah membahas pengaruh sistem pentanahan terhadap kinerja proteksi petir pada saluran transmisi maupun hubungan karakteristik sambaran petir terhadap kejadian gangguan (Nasir et al., 2021; Shariatinasab et al., 2020; Xue et al., 2022). Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa tahanan pentanahan, karakteristik arus petir, dan konfigurasi sistem transmisi memiliki peran dalam menentukan tingkat kerentanan saluran terhadap gangguan akibat petir. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa peningkatan kualitas sistem pentanahan dapat mengurangi risiko terjadinya *back flashover* dan meningkatkan kinerja proteksi petir pada jaringan transmisi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada analisis teknis sistem pentanahan atau evaluasi parameter petir secara terpisah serta dilakukan melalui pendekatan simulasi atau studi kasus pada kondisi tertentu. Hingga saat ini, penelitian yang mengevaluasi secara kuantitatif hubungan antara frekuensi sambaran petir, nilai tahanan pentanahan tower, dan kejadian gangguan saluran transmisi berdasarkan data operasional aktual dalam periode pengamatan yang panjang masih relatif terbatas, khususnya pada sistem transmisi 150 kV di Indonesia. Selain itu, evaluasi komparatif terhadap efektivitas metode perbaikan sistem pentanahan yang telah diterapkan di lapangan, seperti *Multi Rod Grounding* (MRG), *Multi Direct Grounding* (MDG), dan Penyempurnaan Sistem Pentanahan Tower (PSPT), juga masih jarang dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui analisis statistik berbasis data lapangan sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih objektif mengenai kontribusi masing-masing parameter terhadap gangguan akibat sambaran petir serta efektivitas metode perbaikan sistem pentanahan yang diterapkan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan suatu penelitian yang mampu mengevaluasi pengaruh kondisi sistem pentanahan terhadap gangguan akibat sambaran petir secara kuantitatif dan berbasis data lapangan. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis hubungan antara jumlah sambaran petir, nilai tahanan pentanahan tower, serta kejadian gangguan sistem transmisi akibat sambaran petir menggunakan pendekatan statistik. Di samping itu, penelitian ini juga mencakup analisis mengenai seberapa efektif berbagai metode yang digunakan dalam perbaikan sistem pentanahan yang telah diterapkan pada tower transmisi.

Melalui pendekatan ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih objektif mengenai faktor-faktor yang berperan dalam kejadian gangguan akibat sambaran petir, serta mengidentifikasi metode perbaikan sistem pentanahan yang paling efektif dalam meningkatkan keandalan sistem transmisi. Dengan demikian, hasil penelitian yang dilakukan diharapkan bisa dimanfaatkan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis oleh PT PLN (Persero) dalam penyusunan langkah strategis pemeliharaan dan perbaikan sistem pentanahan secara lebih tepat, efektif, dan berorientasi pada data.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT) 150 kV Tanjung Jati – Sayung yang berada dalam wilayah kerja PT PLN (Persero) Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) Kudus, UPT Semarang. Saluran transmisi ini menghubungkan Gardu Induk 150 kV Tanjung Jati di Kabupaten Jepara dengan Gardu Induk 150 kV Sayung di Kabupaten Demak. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data nilai tahanan pentanahan tower, data jumlah sambaran petir, data histori perbaikan sistem pentanahan, serta data gangguan sistem transmisi akibat sambaran petir dalam periode tahun 2021 hingga 2025. Proses pengolahan dan analisis data dilakukan pada tahun 2025 hingga 2026.

2.2 Data dan Variabel Penelitian

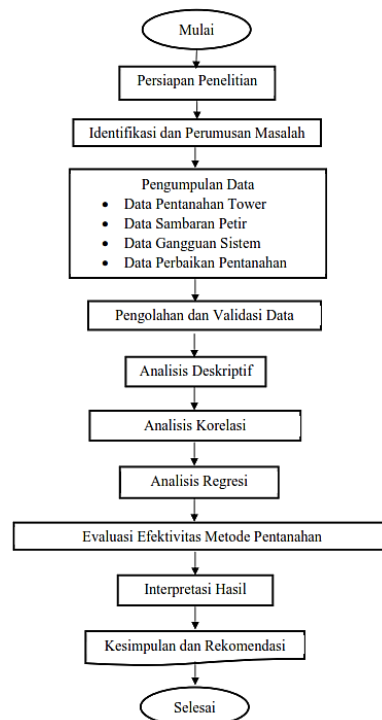
Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder yang diperoleh dari sistem operasional pemeliharaan transmisi serta sumber pendukung lainnya. Data primer meliputi data nilai tahanan pentanahan tower hasil pengukuran pemeliharaan rutin, data histori perbaikan sistem pentanahan, serta data gangguan sistem transmisi akibat sambaran petir yang diperoleh dari PLN ULTG Kudus dan UPT Semarang. Data sekunder meliputi data jumlah dan lokasi sambaran petir yang diperoleh dari sistem deteksi petir Vaisala Lightning Detection System yang terbukti mampu memberikan informasi lokasi dan waktu kejadian petir secara akurat sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis gangguan pada sistem transmisi tenaga listrik, serta data pendukung berupa standar teknis dan literatur terkait sistem pentanahan dan proteksi petir (Anggoro & Makkulau, 2023; Cummins & Murphy, 2009).

Rentang waktu data yang digunakan dalam penelitian ini adalah periode tahun 2021 hingga 2025. Variabel penelitian terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas meliputi jumlah sambaran petir dan nilai tahanan pentanahan, sedangkan variabel terikat adalah jumlah gangguan sistem transmisi akibat sambaran petir.

2.3 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis statistik untuk mengkaji hubungan antara variabel yang diteliti. Analisis data dilakukan melalui pendekatan deskriptif dan inferensial. Pendekatan korelasi Pearson dan regresi linier sederhana dipilih karena penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi awal terhadap hubungan antara frekuensi sambaran petir, nilai tahanan pentanahan tower, dan kejadian gangguan berdasarkan data operasional yang tersedia. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian eksploratif untuk mengidentifikasi arah hubungan, kekuatan hubungan, serta kecenderungan pengaruh antar variabel sebelum dilakukan pengembangan model

yang lebih kompleks. Dengan demikian, hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai keterkaitan antar variabel yang diteliti pada objek penelitian (Montgomery & Runger, 2021; Walpole et al., 2011). Diagram alir penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan Gambar 1, penelitian dimulai dari tahap persiapan dan identifikasi masalah, dilanjutkan dengan pengumpulan data yang meliputi data pentanahan tower, sambaran petir, gangguan sistem, serta data perbaikan pentanahan. Data yang diperoleh kemudian diolah dan divalidasi sebelum dilakukan analisis deskriptif, korelasi, dan regresi. Tahap akhir penelitian berupa evaluasi efektivitas metode sistem pentanahan, interpretasi hasil, serta penarikan kesimpulan dan rekomendasi.

2.4 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui tahapan pengolahan data, analisis statistik, serta pengujian hipotesis untuk mengevaluasi pengaruh sambaran petir dan sistem pentanahan terhadap gangguan sistem transmisi. Data terlebih dahulu diolah melalui proses pengelompokan, tabulasi, serta verifikasi untuk memastikan konsistensi dan keandalan data. Variabel dalam penelitian ini terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas meliputi nilai tahanan pentanahan tower dan jumlah sambaran petir, sedangkan variabel terikat adalah jumlah gangguan sistem transmisi akibat sambaran petir.

Analisis dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif dan inferensial. Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik data, sedangkan analisis inferensial dilakukan menggunakan korelasi Pearson untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan antar variabel (Misbahuddin; Hasan, 2013), serta regresi linier sederhana untuk menganalisis pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat (Gujarati, 2003)

Pengujian signifikansi dilakukan pada tingkat signifikansi sebesar 5% ($\alpha = 0,05$), dimana hubungan dinyatakan signifikan apabila nilai p-value $< 0,05$ (Gujarati, 2003). Untuk menginterpretasikan kekuatan hubungan antar variabel, digunakan kriteria koefisien korelasi, dimana nilai 0,00 dikategorikan tidak ada korelasi, 0,01–0,20 dikategorikan sangat rendah atau lemah sekali, 0,21–0,40 rendah atau lemah tapi pasti, 0,41–0,70 cukup berarti atau sedang, 0,71–0,90 tinggi atau kuat, 0,91–0,99 sangat tinggi atau kuat sekali, dan nilai 1,00 dikategorikan sempurna (Misbahuddin; Hasan, 2013). Selain itu, dilakukan evaluasi efektivitas metode perbaikan sistem pentanahan yang telah diimplementasikan dengan membandingkan probabilitas gangguan sebelum dan setelah perbaikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

3.1.1 Jumlah Sambaran Petir

Jumlah sambaran petir merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi keandalan sistem transmisi tenaga listrik, khususnya pada saluran udara tegangan tinggi yang berada pada wilayah dengan aktivitas petir tinggi. Sambaran

petir yang terjadi di sekitar jalur transmisi dapat menimbulkan tegangan lebih dan meningkatkan risiko terjadinya gangguan pada sistem transmisi.

Data jumlah sambaran petir pada SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung diperoleh dari sistem deteksi petir Vaisala Falls Client yang digunakan oleh PT PLN (Persero) untuk memonitor kejadian petir secara *real time*. Data yang digunakan mencakup kejadian sambaran petir dalam radius ± 1 km dari jalur transmisi selama periode tahun 2021 hingga 2025. Pengolahan data dilakukan untuk mengetahui distribusi sambaran petir berdasarkan waktu kejadian, lokasi tower, serta karakteristik wilayah yang dilalui jalur transmisi. Penyajian data dalam bentuk tabel dan grafik bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai tingkat jumlah sambaran petir serta pola distribusinya pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung.

Tabel 1. Jumlah Sambaran Petir per Tahun SUTT 150 kV Tanjung Jati - Sayung

No	Tahun	Jumlah sambaran petir	Perubahan tahun sebelumnya (%)
1	2021	2879	-
2	2022	3525	22,4
3	2023	2916	-17,3
4	2024	5634	93,2
5	2025	4289	-23,9

Berdasarkan Tabel 1, jumlah sambaran petir pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung selama periode 2021–2025 menunjukkan fluktuasi yang cukup signifikan setiap tahunnya. Pada tahun 2021 tercatat sebanyak 2.879 sambaran petir, kemudian meningkat sebesar 22,4% pada tahun 2022 menjadi 3.525 kejadian. Pada tahun 2023 jumlah sambaran petir menurun sebesar 17,3% menjadi 2.916 kejadian. Peningkatan yang signifikan terjadi pada tahun 2024, dimana jumlah sambaran petir mencapai 5.634 kejadian atau meningkat sebesar 93,2% dibandingkan tahun sebelumnya. Pada tahun 2025 jumlah sambaran petir kembali menurun sebesar 23,9% menjadi 4.289 kejadian, namun nilai tersebut masih tergolong tinggi dibandingkan rata-rata periode pengamatan.

Secara umum, data tersebut menunjukkan bahwa jumlah sambaran petir pada jalur transmisi ini mengalami fluktuasi yang cukup besar selama periode pengamatan. Tingginya jumlah sambaran petir pada beberapa tahun menunjukkan bahwa jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung berada pada wilayah dengan tingkat aktivitas petir yang relatif tinggi.

Tabel 2. Distribusi Sambaran Petir Tertinggi SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

No	Nomor tower	Jumlah sambaran	Persentase (%)
1	T.183	192	1,00
2	T.202	176	0,91
3	T.205	176	0,91
4	T.178	174	0,90
5	T.206	171	0,89
6	T.49	168	0,87
7	T.185	166	0,86
8	T.186	165	0,86
9	T.179	164	0,85
10	T.184	163	0,85

Tabel 3. Distribusi Sambaran Petir Terendah SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

No	Nomor tower	Jumlah sambaran	Persentase (%)
1	T.58	31	0,16
2	T.214	32	0,17
3	T.109	33	0,17
4	T.30	34	0,18
5	T.100	35	0,18
6	T.101	35	0,18
7	T.29	36	0,19
8	T.44	38	0,20
9	T.90	40	0,21
10	T.28	41	0,21

Berdasarkan Tabel 2 dan Tabel 3, distribusi sambaran petir pada tower SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung selama periode 2021–2025 menunjukkan pola sebaran yang tidak merata. Sejumlah tower mengalami jumlah sambaran petir yang sangat tinggi, sementara tower lainnya menerima sambaran dalam jumlah yang relatif rendah. Perbedaan ini mengindikasikan adanya pengaruh faktor geografis, topografi, serta kondisi lingkungan sepanjang jalur transmisi.

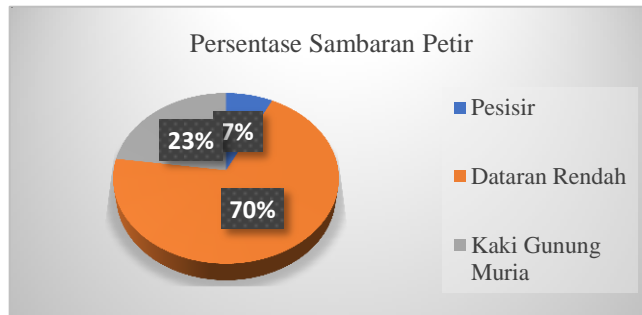
Tower dengan jumlah sambaran petir tertinggi didominasi oleh segmen tertentu, dengan T.183 mencatat jumlah sambaran terbesar yaitu 192 kejadian, diikuti oleh T.202 dan T.205 masing-masing 176 kejadian, serta T.178 sebanyak

174 kejadian. Selain itu, T.206, T.49, T.185, T.186, T.179, dan T.184 juga menunjukkan jumlah sambaran yang sangat tinggi. Konsentrasi sambaran petir yang tinggi pada tower-tower tersebut menunjukkan adanya zona dengan aktivitas petir yang relatif tinggi, yang menjadi dasar untuk dilakukan analisis lebih lanjut terhadap keterkaitannya dengan kejadian gangguan pada sistem transmisi. Sebaliknya, Tabel 3 menunjukkan tower dengan jumlah sambaran petir terendah, seperti T.58 dengan 31 kejadian, diikuti T.214 dan T.109 masing-masing 32 dan 33 kejadian. Tower lain seperti T.30, T.100, T.101, dan T.29 juga menunjukkan jumlah sambaran yang relatif rendah.

Perbandingan antara tower dengan jumlah sambaran tertinggi dan terendah menunjukkan bahwa distribusi sambaran petir sepanjang jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung tidak merata dan cenderung terlokalisasi pada segmen tertentu. Hal ini mengindikasikan adanya variasi intensitas sambaran petir antar tower pada jalur transmisi yang diamati.

Tabel 4. Distribusi dan Jumlah Sambaran Petir Berdasarkan Segmen Wilayah SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

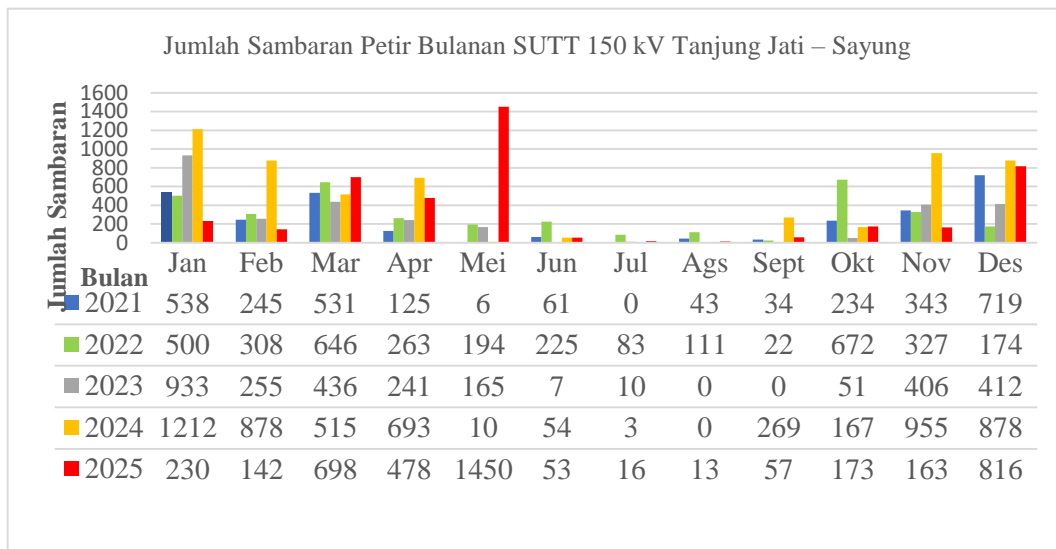
No	Segmen wilayah	Rentang tower	Jumlah tower	Jumlah sambaran	Jumlah sambaran (Kejadian/Tower)
1	Pesisir	T1-20	20	1418	71
2	Dataran Rendah (Sawah/Kebun)	T21-45; T101-214	139	13433	97
3	Kaki Gunung Muria	T46-100	55	4392	80



Gambar 2. Persentase Sambaran Petir SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 2, distribusi sambaran petir pada SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung menunjukkan variasi antar segmen wilayah. Segmen dataran rendah (sawah/kebun) mencatat jumlah sambaran tertinggi yaitu 13.433 kejadian atau 70% dari total sambaran, dengan rata-rata sebesar 97 kejadian per tower. Segmen kaki Gunung Muria menempati urutan kedua dengan jumlah 4.392 kejadian (23%) dan rata-rata 80 kejadian per tower. Sementara itu, segmen pesisir menunjukkan jumlah sambaran terendah yaitu 1.418 kejadian (7%) dengan rata-rata 71 kejadian per tower. Apabila dibandingkan berdasarkan jumlah sambaran per tower, segmen dataran rendah menunjukkan nilai tertinggi, diikuti oleh kaki gunung dan pesisir. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi sambaran petir pada jalur transmisi tidak merata dan bervariasi pada masing-masing segmen wilayah.

Untuk melengkapi analisis spasial tersebut, pola temporal kejadian petir juga dianalisis berdasarkan distribusi jumlah sambaran petir per bulan. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi periode waktu dengan aktivitas petir tertinggi sehingga dapat memberikan gambaran pola musiman yang mempengaruhi keandalan sistem transmisi. Hasil distribusi jumlah sambaran petir berdasarkan bulan disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Jumlah Sambaran Petir per Bulan SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

Berdasarkan Gambar 3, distribusi jumlah sambaran petir bulanan pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung selama periode 2021–2025 menunjukkan variasi yang cukup jelas antar bulan. Penyajian data dalam bentuk grafik memudahkan untuk melihat pola kenaikan dan penurunan jumlah sambaran petir sepanjang tahun pengamatan. Secara umum, jumlah sambaran petir terlihat lebih tinggi pada beberapa bulan tertentu seperti Januari, Februari, Maret, November, dan Desember, dimana jumlah kejadian sambaran petir pada bulan-bulan tersebut relatif lebih besar dibandingkan bulan lainnya pada sebagian besar tahun pengamatan. Sebaliknya, pada periode Juni hingga September jumlah sambaran petir cenderung lebih rendah dibandingkan bulan lainnya.

Grafik juga menunjukkan adanya variasi jumlah sambaran petir antar tahun. Pada tahun 2024 terlihat peningkatan jumlah sambaran petir yang cukup signifikan pada beberapa bulan seperti Januari, Februari, November, dan Desember dibandingkan tahun lainnya. Selain itu, terdapat nilai yang cukup menonjol pada bulan Mei tahun 2025, dimana jumlah sambaran petir tercatat mencapai 1.450 kejadian, yang merupakan nilai tertinggi selama periode pengamatan.

Secara keseluruhan, grafik distribusi bulanan ini menunjukkan bahwa jumlah sambaran petir pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung memiliki variasi bulanan yang cukup jelas selama periode penelitian. Informasi ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis lebih lanjut terhadap kejadian gangguan sistem serta evaluasi kondisi sistem pentanahan tower pada jalur transmisi yang diteliti.

3.1.2 Gangguan Sistem Akibat Sambaran Petir

Gangguan yang terjadi akibat sambaran petir pada sistem transmisi umumnya bersifat sementara (*temporary fault*) dan seringkali diikuti oleh operasi sistem proteksi berupa *reclose*, yaitu proses penyambungan kembali secara otomatis oleh sistem proteksi setelah gangguan terdeteksi dan hilang. Mekanisme ini bertujuan untuk menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik tanpa memerlukan intervensi manual dari operator sistem.

Pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung, kejadian gangguan akibat sambaran petir tercatat melalui sistem monitoring operasi dan laporan lapangan yang dilakukan oleh unit pemeliharaan transmisi. Data gangguan yang dianalisis pada penelitian ini mencakup periode tahun 2021 hingga Februari 2026, dengan parameter yang diamati meliputi waktu kejadian gangguan, lokasi tower yang terdampak, besar arus petir yang terdeteksi, jenis gangguan yang terjadi, serta temuan kondisi peralatan di lapangan.

Tabel 5. Data Gangguan Akibat Petir SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

No	Tanggal	Nomor tower	Arus petir (kA)	Gangguan	Temuan	Keterangan
1	07-Apr-21	145	33	Reclose	Isolator flashover fasa S, nilai grounding diatas standar T.144 leg A,B,D	Line 2
2	07-Nov-21	113	30	Reclose	Archiving horn flashover fasa T, nilai grounding diatas standar T.113 leg A,B dan T.114 leg A,B,C,D	Line 1
3	15-Dec-21	197	27	Reclose	Archiving horn flashover fasa T, nilai grounding diatas standar T.197 leg B	Line 1
4	16-Jan-22	160	25	Reclose	Archiving horn flashover fasa R	Line 2
5	25-Jun-22	154	170	Reclose	Archiving horn flashover fasa R dan T	Line 1
6	25-Jun-22	154	170	Reclose	Archiving horn flashover fasa R	Line 2
7	27-Jun-22	141	115	Reclose	Archiving horn flashover fasa T	Line 1
8	31-Dec-22	185	215	Reclose	Archiving horn flashover fasa R, nilai grounding diatas standar leg C dan D	Line2
9	04-Feb-23	172	11	Reclose	Archiving horn flashover fasa T	Line 1
10	07-May-23	127	96	Reclose	Archiving horn flashover fasa R	Line 2
11	15-Nov-23	28	19	Reclose	Archiving horn flashover fasa R	Line 2
12	06-Dec-23	58	48	Reclose	Archiving horn flashover fasa R	Line 1
13	17-Jan-24	11	126	Reclose	Archiving horn flashover fasa T	Line 1
14	13-Jan-25	10	38	Reclose	Isolator dan archiving horn flashover fasa T	Line 1
15	13-Jan-25	10	38	Reclose	Archiving horn flashover fasa R, Isolator flashover fasa R,T, jumper OPGW lepas dan terdapat bekas flashover	Line 2
16	17-Apr-25	52	50	Reclose	Archiving horn flashover fasa T	Line 1
17	10-Jan-26	60	37	Reclose	Archiving horn flashover fasa S	Line 2
18	11-Jan-26	49	89	Reclose	Archiving horn flashover fasa R, isolator flashover fasa S	Line 2
19	25-Feb-26	182	31	Reclose	Archiving horn flashover fasa T	Line 1

Berdasarkan Tabel 5, selama periode 2021 hingga 28 Februari 2026, tercatat 19 kejadian gangguan sistem transmisi pada SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung yang dipicu oleh sambaran petir. Seluruh gangguan yang terjadi

berupa *recluse*, yang menunjukkan bahwa gangguan bersifat sementara. Sebagian besar gangguan disebabkan oleh kejadian *flash* pada *arching horn*, baik pada fasa R, S, maupun T. Selain itu, beberapa kejadian juga disertai dengan *flash* pada isolator dan konduktor. Temuan lapangan juga menunjukkan adanya kondisi mekanis yang menyertai gangguan, seperti jumper OPGW yang lepas dari struktur tower. Pada beberapa tower, ditemukan nilai tahanan pentanahan yang berada di atas standar, seperti pada tower T113, T114, T144, dan T197. Selain itu, terdapat gangguan dengan nilai arus petir yang relatif besar, seperti 215 kA pada tower T185, 170 kA pada tower T154, dan 126 kA pada tower T11.

Secara umum, dari data sambaran petir dan data gangguan menunjukkan bahwa tidak seluruh kejadian sambaran petir menyebabkan gangguan pada sistem transmisi.

3.1.3 Kondisi Nilai Tahanan Pentanahan Tower

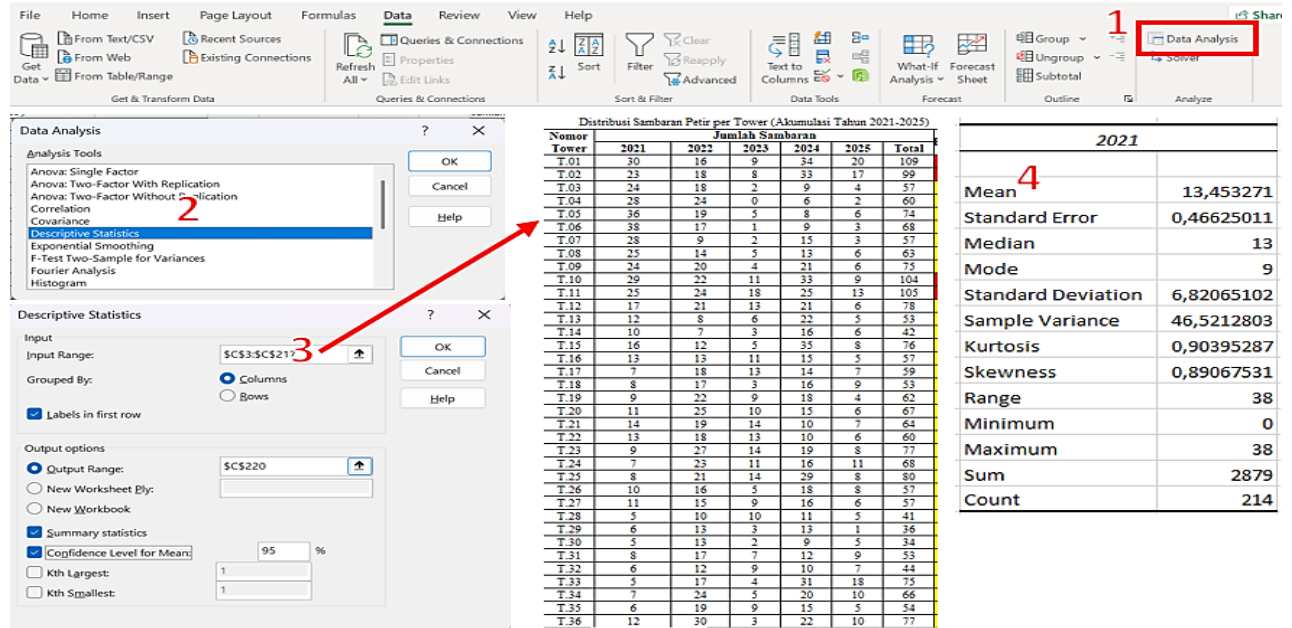
Pengukuran nilai tahanan pentanahan pada tower transmisi dilakukan secara berkala sebagai bagian dari kegiatan pemeliharaan jaringan oleh ULTG Kudus untuk memastikan bahwa nilai tahanan pentanahan masih berada dalam batas standar yang ditetapkan. Pada sistem transmisi 150 kV, nilai tahanan pentanahan tower umumnya disyaratkan tidak melebihi 10 Ω (PT PLN (Persero), 2014).

Tabel 6. Sampel Kondisi Nilai Tahanan Pentanahan Tower SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

No	Nomor tower	Nilai tahanan pentanahan tertinggi (Ω)				
		2021	2022	2023	2024	2025
1	10	8,32	9,76	4,47	8,4	2,49
2	11	5,7	2,6	3,9	9,8	2,84
3	28	3,4	2,24	5,9	3,57	1,28
4	49	8,17	8,23	5,16	4,89	9,9
5	52	6,23	6,72	5,89	7,07	1,89
6	53	7,5	7,18	9,09	8,81	3,24
7	54	2,49	2,44	9,16	3,62	4,37
8	55	6,62	6,75	7,18	9,5	4,37
9	58	12	13,09	2,1	8,6	2,95
10	59	5,8	6,98	2,93	7,87	2,31
11	60	10	9,8	3,39	4,29	2,01
12	70	9,88	4,71	2,69	2,43	1,66
13	113	3,12	2,9	2,86	2,86	1,6
14	127	0,72	1,14	6,58	1,75	2,99
15	141	1,1	0,9	2,22	1,59	0,44
16	145	2,46	0,98	3,54	2,1	0,93
17	154	1,61	0,89	6,54	6,54	0,37
18	160	1,95	0,9	4,67	4,67	0,65
19	172	4,63	4,12	0,1	1,14	2,39
20	177	3,45	44	0,58	3,54	0,56
21	178	6,8	13,28	0,08	2,21	0,52
22	179	4,46	26,6	0,23	6,26	0,59
23	181	3,36	15	0,11	2,06	0,77
24	182	9,18	Terendam	0,36	4,26	1,33
25	183	2,06	22,4	0,26	5,22	1,31
26	184	3,76	34	0,12	5,15	1
27	185	5,8	165,9	0,1	2,77	1,03
28	186	5,7	37,9	2,91	6,26	1,82
29	197	2,38	Terendam	0,96	1,73	0,3
30	201	6,11	Terendam	0,69	4,5	2,92
31	202	1,85	Terendam	0,18	4,62	0,36
32	205	1,4	Terendam	0,15	4,71	8,2

Berdasarkan Tabel 6, nilai tahanan pentanahan pada tower sampel di jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung selama periode 2021–2025 menunjukkan variasi antar tower dan antar tahun pengukuran. Secara umum, sebagian besar nilai tahanan pentanahan berada di bawah batas standar yang ditetapkan, yaitu sebesar 10 Ω. Namun demikian, pada tahun 2022 terdapat beberapa tower dengan nilai tahanan pentanahan yang relatif tinggi dibandingkan tahun lainnya. Nilai maksimum yang tercatat pada tahun tersebut mencapai lebih dari 100 Ω, serta beberapa tower lainnya berada di atas batas standar. Selain itu, terdapat beberapa tower dengan keterangan kondisi “terendam” pada tahun 2022, yang menunjukkan bahwa pengukuran tidak dapat dilakukan akibat kondisi lingkungan di sekitar tower. Pada tahun-tahun berikutnya, yaitu 2023 hingga 2025, nilai tahanan pentanahan pada tower yang diamati menunjukkan kecenderungan yang lebih rendah dibandingkan tahun 2022. Nilai maksimum dan variasi data pada periode tersebut relatif lebih kecil, sehingga menunjukkan perubahan kondisi nilai tahanan pentanahan pada tower yang diamati.

3.1.4 Analisis Deskriptif

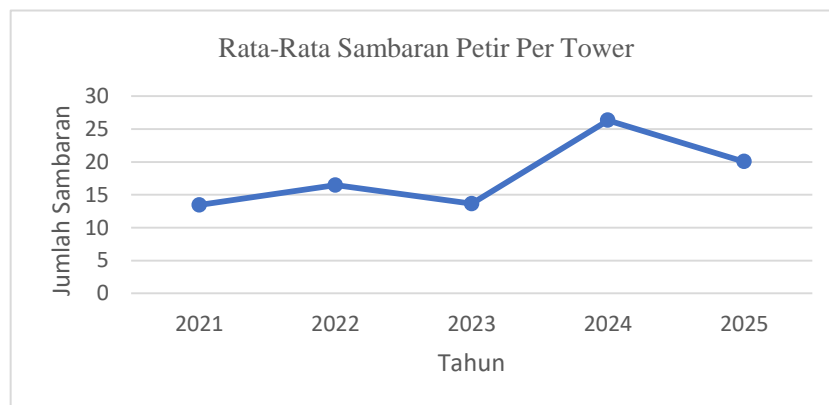


Gambar 4. Analisis Deskriptif menggunakan *Data Analysis* Microsoft Excel

Pada Gambar 4, langkah pertama ditunjukkan pada angka 1 dengan memilih tab Data dan klik *Data Analysis*, kemudian pilih *Descriptive Statistics* seperti ditunjukkan pada angka 2. Selanjutnya pilih *range data* yang akan dilakukan analisis seperti terlihat pada angka 3, beri *checklist* pada hasil *output* yang diinginkan beserta *confidence level* yang dijadikan acuan, maka hasil akan muncul seperti pada angka 4.

Tabel 7. Statistik Deskriptif Sambaran Petir per Tower

Tahun	N	Minimum	Maximum	Mean	Standar Deviasi
2021	214	0	38	13,45	6,82
2022	214	0	42	16,47	8,22
2023	214	0	58	13,63	8,61
2024	214	0	97	26,33	15,97
2025	214	0	101	20,04	17,35



Gambar 5. Grafik Rata – Rata Sambaran Petir Per Tower Per Tahun SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

Berdasarkan hasil analisis deskriptif pada Tabel 7 dan Gambar 5, distribusi jumlah sambaran petir per tower pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung selama periode 2021–2025 menunjukkan variasi yang cukup besar antar tower dan antar tahun pengamatan. Pada tahun 2021, rata-rata sambaran petir per tower sebesar 13,45 kejadian dengan nilai maksimum 38 kejadian. Pada tahun 2022 nilai rata-rata meningkat menjadi 16,47 kejadian dengan nilai maksimum 42 kejadian, yang menunjukkan adanya peningkatan jumlah sambaran petir dibandingkan tahun sebelumnya.

Pada tahun 2023 rata-rata sambaran petir per tower sebesar 13,63 kejadian, dengan nilai maksimum mencapai 58 kejadian, yang menunjukkan bahwa meskipun rata-rata sambaran relatif stabil, terdapat beberapa tower yang



mengalami sambaran petir dengan frekuensi yang lebih tinggi. Peningkatan yang cukup signifikan terjadi pada tahun 2024, dimana rata-rata sambaran petir meningkat menjadi 26,33 kejadian per tower dengan nilai maksimum 97 kejadian.

Pada tahun 2025 rata-rata sambaran petir tercatat sebesar 20,04 kejadian per tower dengan nilai maksimum mencapai 101 kejadian. Selain itu, nilai standar deviasi yang relatif tinggi menunjukkan bahwa distribusi sambaran petir antar tower tidak merata, dimana beberapa tower menerima jumlah sambaran petir yang jauh lebih tinggi dibandingkan tower lainnya.

Tabel 8. Statistik Deskriptif Gangguan Sistem per Tower

Tahun	N	Minimum	Maximum	Mean	Standar Deviasi
2021	214	0	1	0,014	0,118
2022	214	0	2	0,023	0,18
2023	214	0	1	0,019	0,136
2024	214	0	1	0,005	0,068
2025	214	0	2	0,014	0,153

Berdasarkan hasil analisis deskriptif pada Tabel 8, jumlah gangguan sistem akibat sambaran petir pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung selama periode pengamatan menunjukkan nilai yang relatif kecil dibandingkan dengan jumlah tower yang dianalisis. Nilai rata-rata gangguan per tower setiap tahun berada pada kisaran 0,005 hingga 0,023 kejadian, yang menunjukkan bahwa sebagian besar tower tidak mengalami gangguan selama periode pengamatan.

Nilai maksimum gangguan yang tercatat pada data pengamatan adalah dua kejadian dalam satu tower per tahun, yang terjadi pada beberapa tower tertentu dan merupakan sambaran petir yang menyebabkan *reclose* pada penghantar line 1 dan line 2. Sementara itu, nilai minimum gangguan pada setiap tahun adalah nol, yang menunjukkan bahwa sebagian besar tower tidak mengalami gangguan akibat sambaran petir. Nilai standar deviasi yang relatif kecil juga menunjukkan bahwa distribusi gangguan antar tower cenderung rendah dan hanya terjadi pada sebagian kecil tower dalam sistem transmisi yang diamati.

Tabel 9. Statistik Deskriptif Nilai Tahanan Pentanahan Tower

Tahun	N	Minimum (Ω)	Maximum (Ω)	Mean (Ω)	Standar Deviasi (Ω)
2021	206	0,05	11,87	1,57	1,77
2022	188	0,03	8,1	1,69	1,61
2023	214	0,07	533	9,91	38,44
2024	214	0,17	59,9	4,96	5,57
2025	214	0,27	51,7	2,14	3,72

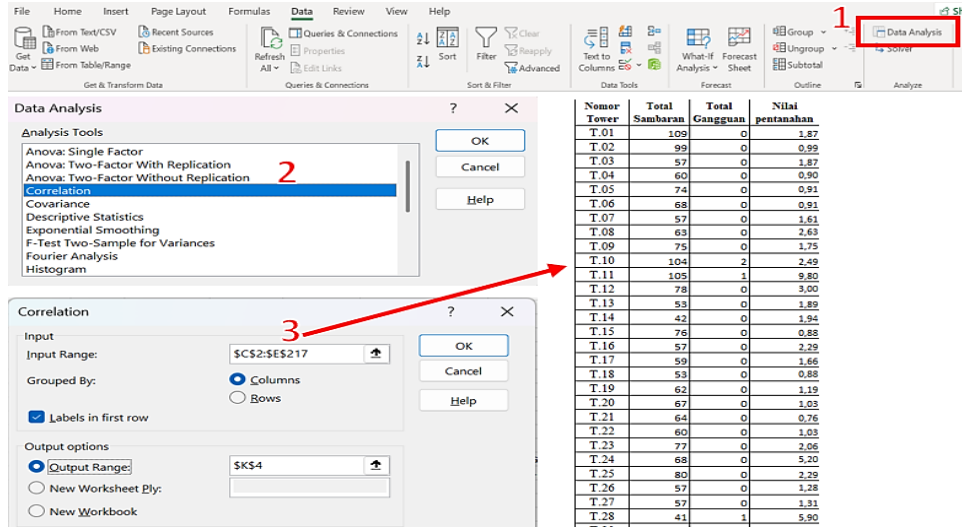
Berdasarkan Tabel 9, nilai tahanan pentanahan tower pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar tahun pengamatan. Pada tahun 2021, nilai rata-rata tahanan pentanahan sebesar 1,57 Ω dengan nilai minimum 0,05 Ω dan maksimum 11,87 Ω , yang menunjukkan bahwa sebagian besar tower memiliki nilai tahanan pentanahan yang relatif rendah. Pada tahun 2022, nilai rata-rata tahanan pentanahan sedikit meningkat menjadi 1,69 Ω dengan nilai maksimum sebesar 8,1 Ω . Namun demikian, jumlah data yang digunakan pada tahun ini hanya sebanyak 188 tower, lebih sedikit dibandingkan tahun lainnya. Hal ini disebabkan karena sebagian tower tidak dapat dilakukan pengukuran akibat kondisi area tower yang terendam air, sehingga pengambilan data tidak dapat dilaksanakan pada saat inspeksi.

Pada tahun 2023, nilai rata-rata tahanan pentanahan meningkat menjadi 9,91 Ω dengan nilai maksimum yang cukup tinggi yaitu 533 Ω , serta standar deviasi yang besar, yaitu 38,44 Ω , yang menunjukkan adanya variasi nilai yang sangat lebar pada beberapa tower. Selanjutnya, pada tahun 2024 nilai rata-rata tahanan pentanahan menurun menjadi 4,96 Ω dengan nilai maksimum 59,9 Ω , dan kembali menurun pada tahun 2025 menjadi 2,14 Ω dengan nilai maksimum 51,7 Ω . Nilai minimum pada periode tersebut berada pada kisaran 0,17 Ω hingga 0,27 Ω .

Secara umum, hasil analisis deskriptif ini menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan pada tower transmisi memiliki variasi yang cukup besar antar tower dan antar tahun pengamatan. Perbedaan jumlah data (N) pada masing-masing tahun disebabkan oleh keterbatasan pelaksanaan pengukuran di lapangan, khususnya pada kondisi tertentu seperti genangan air di area tower yang menyebabkan sebagian tower tidak dapat dilakukan pengukuran. Data nilai tahanan pentanahan ini selanjutnya digunakan sebagai salah satu parameter dalam analisis hubungan dengan kejadian gangguan sistem serta dalam evaluasi efektivitas metode perbaikan sistem pentanahan pada subbab berikutnya.

3.1.5 Analisis Korelasi

Pada Gambar 6, langkah pertama ditunjukkan pada angka 1 dengan memilih tab Data dan klik *Data Analysis*, kemudian pilih *Correlation* seperti ditunjukkan pada angka 2. Selanjutnya pilih *range data* yang akan dilakukan analisis seperti terlihat pada angka 3, beri *checkboxlist* pada hasil *output* yang diinginkan, maka hasil matrik korelasi akan muncul seperti pada Tabel 10.



Gambar 6. Analisis Korelasi menggunakan *Data Analysis* Microsoft Excel

Tabel 10. Matrik Korelasi Jumlah Sambaran vs Jumlah Gangguan vs Nilai Tahanan Pentanahan

Variabel	Jumlah Sambaran	Jumlah Gangguan	Nilai Pentanahan
Jumlah Sambaran	1		
Jumlah Gangguan	0,137	1	
Nilai Pentanahan	0,159	0,213	1

Berdasarkan Tabel 10, diperoleh nilai koefisien korelasi antara jumlah sambaran petir dengan jumlah gangguan sistem sebesar 0,137, yang menunjukkan adanya hubungan positif dengan kekuatan yang sangat rendah. Hubungan positif ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sambaran petir cenderung diikuti dengan peningkatan jumlah gangguan sistem. Sementara itu, hubungan antara nilai tahanan pentanahan dengan jumlah gangguan sistem memiliki nilai korelasi sebesar 0,213, yang menunjukkan hubungan positif dengan kekuatan yang lemah tapi pasti. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai tahanan pentanahan cenderung diikuti dengan peningkatan jumlah gangguan sistem. Adapun hubungan antara jumlah sambaran petir dengan nilai tahanan pentanahan diperoleh nilai korelasi sebesar 0,159, yang menunjukkan hubungan positif dengan kekuatan yang sangat rendah. Hubungan ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sambaran petir cenderung diikuti dengan peningkatan nilai tahanan pentanahan pada tower yang diamati.

Secara umum, nilai koefisien korelasi yang diperoleh menunjukkan bahwa hubungan antar variabel yang dianalisis berada pada kategori sangat rendah dan lemah. Untuk mengetahui apakah hubungan antar variabel yang diperoleh pada Tabel 10 bersifat signifikan secara statistik atau hanya terjadi secara kebetulan, dilakukan pengujian signifikansi koefisien korelasi menggunakan statistik t. Nilai statistik t yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai p-value. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa hubungan antara jumlah sambaran petir, nilai tahanan pentanahan, dan jumlah gangguan sistem memiliki dasar statistik yang memadai. Dalam penelitian ini digunakan tingkat signifikansi sebesar $\alpha = 0,05$, dimana hubungan antar variabel dinyatakan signifikan apabila nilai p-value $< 0,05$, sedangkan apabila p-value $> 0,05$ maka hubungan tersebut dianggap tidak signifikan secara statistik.

Tabel 11. Hasil Uji Signifikansi Korelasi Antar Variabel

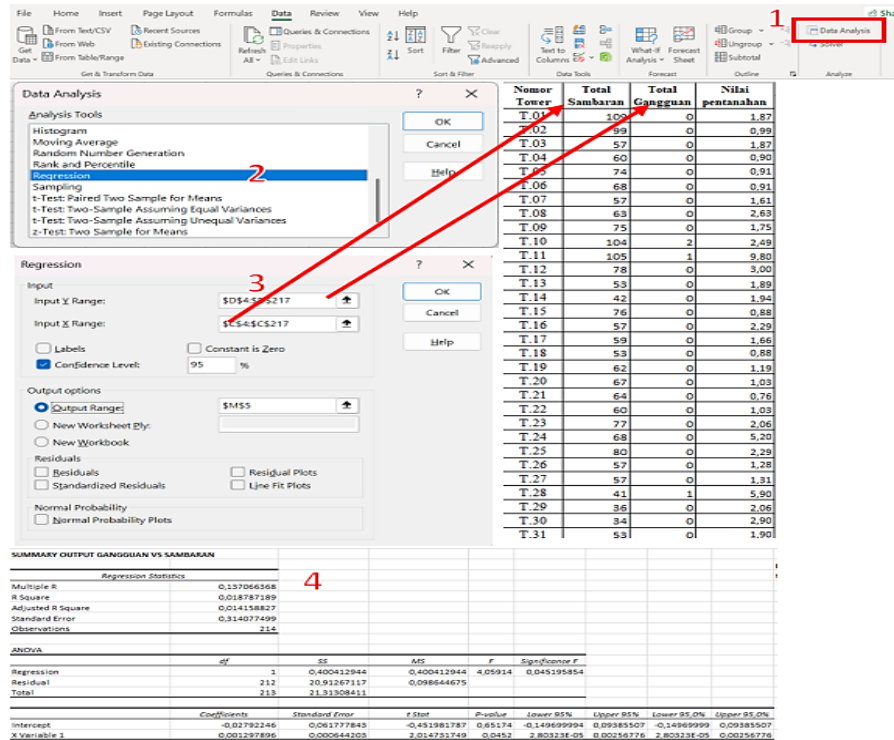
Hubungan Variabel	P-Value	Keterangan
Jumlah Sambaran - Jumlah Gangguan	0,0452	Signifikan
Nilai tahanan pentanahan - Jumlah Gangguan	0,0017	Signifikan
Jumlah Sambaran - Nilai tahanan pentanahan	0,0202	Signifikan

Berdasarkan Tabel 11, hasil pengujian signifikansi menunjukkan bahwa hubungan antara jumlah sambaran petir dengan jumlah gangguan sistem memiliki nilai p-value sebesar 0,0452, yang lebih kecil dari tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, sehingga hubungan tersebut dinyatakan signifikan secara statistik. Selain itu, hubungan antara nilai tahanan pentanahan dengan jumlah gangguan sistem memiliki nilai p-value sebesar 0,0017, serta hubungan antara jumlah sambaran petir dengan nilai tahanan pentanahan memiliki nilai p-value sebesar 0,0202, dimana kedua nilai tersebut juga lebih kecil dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh hubungan antar variabel yang dianalisis pada penelitian ini signifikan secara statistik.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa hubungan antara jumlah sambaran petir, nilai tahanan pentanahan, dan jumlah gangguan sistem tidak terjadi secara kebetulan, melainkan memiliki dasar statistik yang dapat diterima pada tingkat signifikansi yang digunakan. Meskipun demikian, nilai koefisien korelasi yang diperoleh pada Tabel 4.10 menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antar variabel masih berada pada kategori lemah. Hasil pengujian signifikansi

ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis lebih lanjut menggunakan pendekatan regresi guna melihat pengaruh variabel secara kuantitatif, yang disajikan pada subbab berikutnya.

3.1.6 Analisis Regresi



Gambar 7. Analisis Regresi menggunakan *Data Analysis* Microsoft Excel

Pada Gambar 7, langkah pertama ditunjukkan pada angka 1 dengan memilih tab Data dan klik *Data Analysis*, kemudian pilih *Regression* seperti ditunjukkan pada angka 2. Selanjutnya pilih *X range* dan *Y range* seperti pada angka 3 yang merupakan data variabel independen dan variabel dependen yang akan dianalisis, serta pilih jenis *output* yang diinginkan, maka hasil akan muncul seperti pada angka 4.

Tabel 12. Hasil Analisis Regresi Linier Sederhana Pengaruh Jumlah Sambaran Petir terhadap Jumlah Gangguan Sistem

Variabel	Koefisien (B)	t-Statistik	P-Value	Keterangan
Konstanta	-0,0279	-0,452	0,6517	Tidak Signifikan
Jumlah Sambaran	0,0013	2,015	0,0452	Signifikan
R Square (R ²)	0,0188	—	—	—
Adjusted R ²	0,0142	—	—	—
Jumlah Data (N)	214	—	—	—

Berdasarkan Tabel 12, hasil analisis regresi linier sederhana menunjukkan bahwa variabel jumlah sambaran petir memiliki nilai koefisien regresi sebesar 0,0013 dengan nilai p-value sebesar 0,0452, sehingga variabel tersebut dinyatakan signifikan secara statistik pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Nilai koefisien regresi yang bernilai positif menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sambaran petir cenderung diikuti dengan peningkatan jumlah gangguan sistem. Sementara itu, nilai konstanta memiliki nilai p-value sebesar 0,6517, yang menunjukkan bahwa konstanta tidak signifikan secara statistik.

Nilai koefisien determinasi (R²) yang diperoleh sebesar 0,0188, yang menunjukkan bahwa variabel jumlah sambaran petir mampu menjelaskan variasi gangguan sistem sebesar 1,88%, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Nilai Adjusted R² sebesar 0,0142 menunjukkan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan variasi data masih relatif kecil.

Tabel 13. Hasil Analisis Regresi Linier Sederhana Pengaruh Nilai Tahanan Pentanahan terhadap Jumlah Gangguan Sistem

Variabel	Koefisien (B)	t-Statistik	P-Value	Keterangan
Konstanta	0,0715	3,27	0,00125	Signifikan
Nilai tahanan pentanahan	0,0057	3,179	0,0017	Signifikan
R Square (R ²)	0,0455	—	—	—
Adjusted R ²	0,041	—	—	—
Jumlah Data (N)	214	—	—	—



Berdasarkan Tabel 13, hasil analisis regresi linier sederhana menunjukkan bahwa variabel nilai tahanan pentanahan memiliki nilai koefisien regresi sebesar 0,0057 dengan nilai p-value sebesar 0,0017, sehingga variabel tersebut dinyatakan signifikan secara statistik pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Nilai koefisien regresi yang bernilai positif menunjukkan bahwa peningkatan nilai tahanan pentanahan cenderung diikuti dengan peningkatan jumlah gangguan sistem. Sementara itu, nilai konstanta memiliki nilai p-value sebesar 0,00125, yang menunjukkan bahwa konstanta juga signifikan secara statistik.

Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh sebesar 0,0455, yang menunjukkan bahwa variabel nilai tahanan pentanahan mampu menjelaskan variasi gangguan sistem sebesar 4,55%, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Nilai Adjusted R^2 sebesar 0,041 menunjukkan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan variasi data tetap relatif kecil setelah disesuaikan dengan jumlah variabel yang digunakan. Hasil ini menunjukkan bahwa variabel nilai tahanan pentanahan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap gangguan sistem, meskipun kontribusi pengaruhnya dalam menjelaskan variasi gangguan masih relatif kecil.

Tabel 14. Hasil Analisis Regresi Linier Sederhana Pengaruh Jumlah Sambaran Petir terhadap Nilai Tahanan Pentanahan

Variabel	Koefisien (B)	t-Statistik	P-Value	Keterangan
Konstanta	88,5623	37,9566	0	Signifikan
Jumlah Sambaran	0,449	2,3408	0,0202	Signifikan
R Square (R^2)	0,0252	–	–	–
Adjusted R^2	0,0206	–	–	–
Jumlah Data (N)	214	–	–	–

Berdasarkan Tabel 14, hasil analisis regresi linier sederhana menunjukkan bahwa variabel jumlah sambaran petir memiliki nilai koefisien regresi sebesar 0,449 dengan nilai p-value sebesar 0,0202, sehingga variabel tersebut dinyatakan signifikan secara statistik pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Nilai koefisien regresi yang bernilai positif menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sambaran petir cenderung diikuti dengan peningkatan nilai tahanan pentanahan. Sementara itu, nilai konstanta memiliki nilai p-value sebesar 0,000, yang menunjukkan bahwa konstanta signifikan secara statistik.

Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh sebesar 0,0252, yang menunjukkan bahwa variabel jumlah sambaran petir mampu menjelaskan variasi nilai tahanan pentanahan sebesar 2,52%, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Nilai Adjusted R^2 sebesar 0,0206 menunjukkan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan variasi data masih relatif kecil.

Secara umum, hasil analisis regresi menunjukkan bahwa ketiga hubungan yang dianalisis, yaitu antara jumlah sambaran petir terhadap gangguan sistem, nilai tahanan pentanahan terhadap gangguan sistem, serta jumlah sambaran petir terhadap nilai tahanan pentanahan, memiliki signifikansi statistik pada tingkat kepercayaan yang digunakan dalam penelitian ini. Namun demikian, selain signifikansi statistik yang ditunjukkan oleh nilai p-value, besarnya koefisien korelasi dan koefisien determinasi juga menjadi pertimbangan penting dalam interpretasi hasil penelitian. Nilai koefisien korelasi yang berada pada kategori sangat rendah hingga rendah serta nilai R^2 yang relatif kecil menunjukkan bahwa hubungan yang ditemukan memiliki kekuatan yang terbatas dalam menjelaskan variasi gangguan. Dengan demikian, jumlah sambaran petir dan nilai tahanan pentanahan hanya menjelaskan sebagian kecil variasi gangguan yang terjadi pada saluran transmisi, sedangkan sebagian besar variasi gangguan kemungkinan dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dianalisis dalam penelitian ini. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diinterpretasikan sebagai adanya hubungan statistik yang terukur antara variabel yang diteliti, namun tidak menunjukkan bahwa variabel tersebut merupakan faktor dominan yang menentukan terjadinya gangguan pada saluran transmisi. Berdasarkan hasil tersebut, dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap efektivitas metode sistem pentanahan yang telah diterapkan pada objek penelitian.

3.1.7 Evaluasi Efektivitas Metode Sistem Pentanahan

Pada jalur SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung, beberapa metode perbaikan sistem pentanahan telah diterapkan pada tower-tower tertentu sebagai bagian dari upaya peningkatan keandalan jaringan transmisi. Metode yang digunakan meliputi *Multi Rod Grounding* (MRG), *Multi Direct Grounding* (MDG), dan Penyempurnaan Sistem Pentanahan Tower (PSPT). Masing-masing metode tersebut diterapkan dengan pendekatan yang berbeda dalam meningkatkan kemampuan disipasi arus petir ke tanah. Evaluasi efektivitas metode perbaikan sistem pentanahan dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan parameter kejadian sebelum dan sesudah penerapan metode pada tower yang dianalisis. Parameter yang digunakan meliputi jumlah sambaran petir serta jumlah gangguan sistem akibat sambaran petir pada masing-masing tower.

Tower yang digunakan dalam evaluasi ini merupakan tower yang memenuhi kriteria ketersediaan data dan relevansi terhadap tujuan evaluasi, yaitu tower yang memiliki data sambaran petir, mengalami gangguan sistem, serta telah dilakukan penerapan atau perbaikan metode pentanahan selama periode pengamatan. Berdasarkan kriteria tersebut, diperoleh sebanyak 32 tower yang digunakan sebagai objek evaluasi. Adapun seluruh tower sebanyak 214 tower tetap digunakan dalam analisis statistik pada subbab sebelumnya untuk menggambarkan hubungan antar variabel secara menyeluruh, sedangkan evaluasi pada subbab ini difokuskan pada tower yang memiliki kondisi yang dapat



dibandingkan untuk menilai efektivitas metode yang diterapkan. Perbandingan efektivitas metode perbaikan sistem pentanahan dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif berdasarkan probabilitas gangguan yang diperoleh dari data operasional selama periode pengamatan. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh dimaksudkan sebagai evaluasi komparatif terhadap kinerja masing-masing metode pada objek penelitian yang dikaji dan tidak digunakan untuk menyimpulkan perbedaan efektivitas secara statistik antar metode.

Tabel 15. Rekapitulasi Efektivitas Metode Sistem Pentanahan terhadap Gangguan Akibat Sambaran Petir SUTT 150 kV Tanjung Jati – Sayung

Metode	Jumlah tower	Jumlah sambaran	Jumlah gangguan	Probabilitas gangguan (%)
Tanpa Perbaikan	32	675	10	1,481
MRG	32	1682	1	0,059
MDG	27	1077	8	0,743
PSPT	5	156	0	0

Berdasarkan Tabel 15, terlihat adanya perbedaan nilai probabilitas gangguan akibat sambaran petir pada tower yang belum dilakukan perbaikan sistem pentanahan dan tower yang telah dilakukan penerapan metode perbaikan. Tower tanpa perbaikan menunjukkan probabilitas gangguan sebesar 1,481%, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan dengan tower yang telah dilakukan perbaikan.

Pada tower yang telah dilakukan perbaikan, metode *Multi Rod Grounding* (MRG) menunjukkan probabilitas gangguan sebesar 0,059%, yang merupakan nilai paling rendah di antara metode yang diterapkan, meskipun jumlah sambaran petir yang diterima relatif tinggi yaitu sebanyak 1682 kejadian. Sementara itu, metode *Multi Direct Grounding* (MDG) memiliki probabilitas gangguan sebesar 0,743%, yang lebih tinggi dibandingkan metode MRG namun masih lebih rendah dibandingkan tower tanpa perbaikan. Adapun metode Penyempurnaan Sistem Pentanahan Tower (PSPT) tidak menunjukkan adanya kejadian gangguan selama periode pengamatan dengan jumlah sambaran petir sebanyak 156 kejadian.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa perbaikan sistem pentanahan berkontribusi terhadap penurunan probabilitas gangguan akibat sambaran petir dibandingkan tower yang belum dilakukan perbaikan. Namun demikian, hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa kejadian gangguan tidak hanya dipengaruhi oleh metode pentanahan yang diterapkan, tetapi kemungkinan dipengaruhi oleh faktor teknis lain yang tidak dianalisis dalam penelitian ini, seperti karakteristik arus petir, kondisi isolasi saluran, konfigurasi tower, maupun kondisi lingkungan setempat. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh lebih tepat digunakan sebagai dasar evaluasi teknis pada objek penelitian yang dikaji daripada sebagai dasar generalisasi untuk seluruh sistem transmisi. Meskipun demikian, penelitian ini memberikan kontribusi berupa evaluasi berbasis data lapangan terhadap hubungan antara frekuensi sambaran petir, tahanan pentanahan tower, dan kejadian gangguan, serta memberikan gambaran mengenai efektivitas relatif metode perbaikan sistem pentanahan yang diterapkan pada ruas SUTT 150 kV Tanjung Jati–Sayung.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pada SUTT 150 kV Tanjung Jati–Sayung periode 2021–2025, diketahui bahwa aktivitas sambaran petir memiliki distribusi yang tidak merata baik secara temporal maupun spasial, dengan konsentrasi kejadian yang lebih tinggi pada bulan-bulan tertentu dan pada beberapa tower yang berada di lokasi tertentu. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa jumlah sambaran petir dan nilai tahanan pentanahan memiliki hubungan positif yang signifikan secara statistik terhadap jumlah gangguan sistem transmisi akibat petir, dengan koefisien korelasi masing-masing sebesar 0,137 dan 0,2133. Namun demikian, nilai koefisien determinasi yang relatif rendah ($R^2 < 5\%$) menunjukkan bahwa kedua variabel tersebut hanya menjelaskan sebagian kecil variasi gangguan yang terjadi, sehingga masih terdapat faktor lain yang berkontribusi terhadap kejadian gangguan pada saluran transmisi. Hasil evaluasi berbasis data operasional menunjukkan bahwa tower yang telah dilakukan perbaikan sistem pentanahan memiliki probabilitas gangguan yang lebih rendah dibandingkan tower tanpa perbaikan. Di antara metode yang diamati, *Multi Rod Grounding* (MRG) menunjukkan probabilitas gangguan paling rendah pada objek penelitian yang dikaji, sedangkan metode *Multi Direct Grounding* (MDG) dan Penyempurnaan Sistem Pentanahan Tower (PSPT) juga menunjukkan kinerja yang baik dengan karakteristik yang berbeda. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan merupakan salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam upaya mitigasi gangguan akibat sambaran petir, meskipun bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan keandalan sistem transmisi. Keterbatasan penelitian ini terletak pada penggunaan variabel yang masih terbatas serta pendekatan evaluasi efektivitas metode yang dilakukan secara deskriptif berdasarkan data operasional. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan penambahan parameter teknis lain yang berkaitan dengan kinerja proteksi petir dan keandalan saluran transmisi untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi gangguan akibat sambaran petir.

REFERENCES

Anderson, J. G. (1982). *Transmission line reference book: 345 kV and above* (2nd ed.). Electric Power Research Institute.



- Anggoro, Y. T., & Makkulau, A. (2023). *Identifikasi Gangguan Petir pada Jaringan Transmisi 150Kv ULTG (Unit Layanan Transmisi Dan Gardu Induk) Singkawang Menggunakan Aplikasi Vaisala Falls Client*. 4, 4865.
- BMKG. (2020). *Peta Sambaran Petir Tahun 2020*. <https://www.bmkg.go.id/geofisika-potensial/peta-sambaran-petir/peta-sambaran-petir-tahun-2020>
- Chen, Y., Ding, T., Li, D., Sun, W., Wen, A., Song, K., & Gao, J. (2026). Analysis of lightning flashover rate and optimization strategies for 220kV transmission line under multiple lightning strokes. *Electric Power Systems Research*, 250(August 2025), 112153. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2025.112153>
- Cooray, V. (2014). The lightning flash: 2nd edition. In *The Lightning Flash*. <https://doi.org/10.1049/PBPO069E>
- Cummins, K., & Murphy, M. (2009). An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions On*, 51, 499–518. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2023450>
- Ghani, R. M., & Hapsari, J. P. (2025). Analisa Efektivitas Pemasangan Multirod-Grounding pada SUTET 500kV Mandirancan-Pemalang Line 3&4 dengan Metode Paired Sample T-Test. *ELECTRICIAN*, 19(2), 138–148. <https://doi.org/https://doi.org/10.23960/elc.v19n2.2910>
- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2011). *Power System Analysis and Design* (5th ed.). Cengage Learning.
- Grcev, L., Markovski, B., & Todorovski, M. (2021). General Formulas for Lightning Impulse Impedance of Horizontal and Vertical Grounding Electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(4), 2245–2248. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3080137>
- Gujarati, D. N. (2003). Basic Econometrics. Fourth Edition. In *The Economic Journal* (Vol. 82, Number 326).
- Heidler, F. H., & Paul, C. (2021). Field Enhancement by Lightning Strikes to Tall Tower Versus Lightning Strikes to Flat Ground. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63(2), 550–557. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3021202>
- Huang, L., Zhou, L., Zhang, D., Wang, D., Gu, W., & Chen, S. (2021). Research on impulse impedance model and protection optimization of transmission tower grounding device in mountainous area. *IET Science, Measurement and Technology*, 15(8), 632–644. <https://doi.org/10.1049/smt2.12064>
- IEEE Std 80-2013. (2013). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. In *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)* (pp. 1–226). <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2015.7109078>
- Ishimoto, K., Tossani, F., Napolitano, F., Borghetti, A., & Nucci, C. A. (2022). Direct Lightning Performance of Distribution Lines With Shield Wire Considering LEMP Effect. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(1), 76–84. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3053620>
- Kumar, S. A., Manickavasagam, K., & Bhandiwad, P. K. (2023). Impulse Efficient Optimum Impedance Grounding Electrode Configuration for Lightning Transients. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 65(6), 1990–1997. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2023.3300539>
- Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.co.id/books?id=2cbvyf8Ly4AC>
- Misbahuddin; Hasan, I. (2013). *Analisis Data Penelitian dengan Statistik* (2nd ed.). Bumi Aksara.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2021). *Applied Probability and Statistics for Engineers*.
- Nasir, N. A. F. M., Kadir, M. Z. A. A., Osman, M., Rahman, M. S. A., Amirulddin, U. A. U., Nasir, M. S. M., Zaini, N. H., & Ali, N. H. N. (2021). Impact of earthing system designs and soil characteristics on tower footing impedance and ground potential rise: A modelling approach for sustainable power operation. *Sustainability (Switzerland)*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/su13158370>
- PT PLN (Persero). (2014). *Pedoman Pemeliharaan Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET)*.
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press. <https://books.google.co.id/books?id=NviMsvVOHJ4C>
- Shariatinasab, R., Safar, J. G., Gholinezhad, J., & He, J. (2020). Analysis of Lightning-Related Stress in Transmission Lines Considering Ionization and Frequency-Dependent Properties of the Soil in Grounding Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(6), 2849–2857. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.2990207>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. E. (2011). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Pearson Education. <https://books.google.co.id/books?id=PcksAAAAQBAJ>
- Warmi, Y., Zulkarnaini, Rajab, A., Yuanisa, C., Elyas, R. O., Nur Putra, A. M., & Anthony, Z. (2023). Proposal of analysis method to reduce back-flashover rate taking account of tower footing resistance. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 13(1), 94–106. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i1.pp94-106>
- Xue, J., Huang, H., Cai, L., Xu, Z., Fang, Y., Wang, J., & Fan, Y. (2022). Lightning Impulse Impedance and Surface Potential Distribution of 10 kV Distribution Line Tower: Field Test and Simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(1), 415–422. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3061210>