

**PENGEMBANGAN METODE ANALISIS PERFORMA
SALURAN UDARA TEGANGAN EKSTRA TINGGI
(SUTET) 500kV TERHADAP SAMBARAN PETIR
STUDI KASUS : SALURAN UDARA TEGANGAN EKSTRA
TINGGI 500kV CAWANG BARU – BEKASI**

Yandri Paulus Marbun

¹Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

Alamat e-mail : yandripaulus@gmail.com

ABSTRACT

This study evaluates the performance of the 500 kV Cawang Baru–Bekasi Extra High Voltage Transmission Line (SUTET) under lightning-induced impulse voltages. Given Indonesia’s high lightning density, lightning strikes were modeled probabilistically using Monte Carlo simulations based on FALLS data (2018–2024). The model achieved good accuracy (MAPE: 14% for strike probability, 12% for density, and 7% for current probability). Tower vulnerability was classified into three categories based on lightning density (N_g). Key factors causing impulse voltage to exceed BIL—triggering back flashover—include lightning current magnitude, ground resistance, and tower inductance. Findings highlight the need for optimizing grounding systems and lightning protection through probabilistic analysis to enhance transmission reliability.

Keywords: *500kV transmission line, lightning strike, Monte Carlo, back flashover (bfo)*

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi performa SUTET 500 kV Cawang Baru–Bekasi terhadap tegangan impuls akibat sambaran petir. Dengan kerapatan petir tinggi di Indonesia, distribusi sambaran dimodelkan secara probabilistik menggunakan simulasi Monte Carlo berbasis data FALLS 2018–2024. Model menunjukkan

akurasi baik (MAPE: 14% probabilitas sambaran, 12% kerapatan, 7% arus). Kerawanan tower diklasifikasikan menjadi tiga kategori berdasarkan N_g . Faktor utama pemicu tegangan impuls melebihi BIL adalah kuat arus, resistansi tanah, dan induktansi tower. Hasil menegaskan pentingnya optimalisasi sistem pentanahan dan proteksi petir berbasis analisis probabilistik untuk meningkatkan keandalan transmisi.

Kata kunci: SUTET 500kV, sambaran petir, *monte carlo*, *back flashover* (bfo)

A. Pendahuluan

Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV berperan penting dalam penyaluran energi dari pusat pembangkit ke pusat beban, namun sangat rentan terhadap gangguan sambaran petir. Tingginya kerapatan petir di Indonesia menjadikan perlindungan terhadap tegangan impuls sebagai aspek krusial dalam menjaga keandalan sistem transmisi.

Untuk memahami pola sambaran yang bersifat acak, diperlukan pendekatan probabilistik berbasis data. Penelitian ini memfokuskan analisis pada SUTET 500 kV Cawang Baru–Bekasi dengan memanfaatkan data historis sambaran petir dari sistem FALLS PLN, yang kemudian dimodelkan menggunakan simulasi Monte Carlo untuk memetakan distribusi, frekuensi, dan dampak sambaran terhadap tegangan impuls.

Rumusan masalah meliputi: (1) pemodelan sambaran petir menggunakan simulasi Monte Carlo, (2) hubungan antara tegangan impuls dan potensi back flashover (bfo), serta (3) tingkat kerawanan sambaran pada tiap segmen jalur transmisi. Penelitian bertujuan mengidentifikasi probabilitas arus petir yang memengaruhi tegangan impuls dan menetapkan kategori performa jalur transmisi berdasarkan perbandingan tegangan impuls dengan Basic Impulse Insulation Level (BIL).

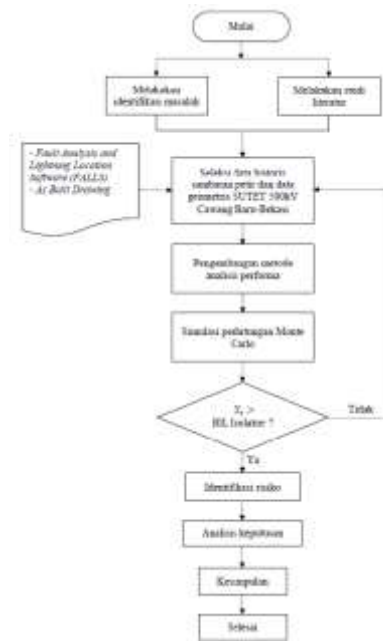
Kontribusi utama studi ini adalah penerapan analisis statistik berbasis data historis yang masih jarang digunakan dalam evaluasi sistem transmisi di Indonesia. Pendekatan ini menawarkan model penilaian risiko sambaran petir yang lebih presisi dan menjadi dasar pengembangan proteksi petir yang lebih efektif untuk meningkatkan keandalan SUTET.

B. Metode

Penelitian ini berfokus pada analisis performa Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500kV Cawang Baru – Bekasi terhadap tegangan impuls akibat sambaran petir. Studi ini bertujuan untuk memodelkan sebaran sambaran petir dan mengevaluasi potensi gangguan sistem transmisi menggunakan pendekatan probabilistik. Lokasi penelitian dilakukan di PT PLN (Persero) GIS dan GISTET 500kV Cawang Baru, Jakarta Timur, selama periode Maret hingga Juni 2025.

1. Desain Penelitian

Penelitian ini berfokus pada analisis performa Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500kV Cawang Baru–Bekasi terhadap tegangan impuls akibat sambaran petir, dengan mempertimbangkan probabilitas terjadinya *back flashover* (*bfo*). Objek penelitian adalah jalur transmisi SUTET 500kV Cawang Baru–Bekasi, dengan pemilihan lokasi berdasarkan intensitas sambaran petir yang tinggi dan kompleksitas struktur jaringan. Penelitian dilakukan di PT PLN (Persero) ULTG Cawang pada periode 1 Maret hingga 30 Juni 2025.



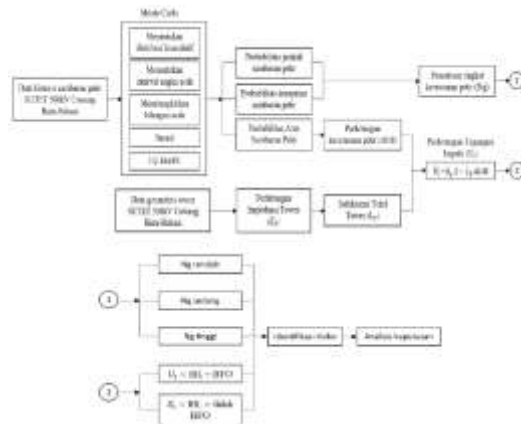
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Data dikumpulkan melalui tiga metode: (1) studi literatur terkait standar dan teori sambaran petir; (2) data historis sambaran petir 2018–2024 dari sistem FALLS PT PLN; dan (3) data geometris tower dari As Built Drawing jalur transmisi. Studi literatur digunakan untuk memahami konsep dan parameter penting, sedangkan data historis dan geometris mendukung pemodelan serta simulasi

2. Metode Pengumpulan dan Analisa Data

Analisis data dilakukan melalui tiga tahap: (1) seleksi dan penyusunan data historis sambaran petir berdasarkan lokasi, jumlah, kerapatan, dan arus; (2) simulasi Monte Carlo untuk memodelkan distribusi probabilistik sambaran serta

mengevaluasi tren dan tingkat kerawanan; dan (3) pemanfaatan hasil simulasi untuk menentukan kategori performa dan menilai potensi gangguan seperti back flashover (BFO) pada jalur transmisi.



Gambar 2. Diagram alir penentuan performa

Analisis data dilakukan melalui tiga tahap: (1) seleksi data historis sambaran petir; (2) simulasi Monte Carlo untuk memodelkan probabilitas sambaran dan kuat arus; serta (3) perhitungan impedansi, induktansi, dan kenaikan tegangan impuls pada tower. Hasil perhitungan dibandingkan dengan Basic Impulse Insulation Level (BIL) isolator untuk menentukan performa tower dalam dua kategori: andal (jika $(U_t) < BIL$) atau tidak andal (jika $(U_t) > BIL$).

3. Landasan Teori

a. SUTET

SUTET adalah saluran transmisi listrik bertegangan lebih dari 245 kV

(umumnya hingga 500 kV) untuk menyalurkan energi listrik jarak jauh dari pembangkit ke pusat beban. Karena berada di ruang terbuka, SUTET rentan terhadap gangguan seperti sambaran petir. Adapun Komponen SUTET terdiri dari:[1]

- Tower: Struktur baja penyangga konduktor, dirancang untuk kekuatan mekanik dan keamanan.
- Konduktor: Penghantar listrik, umumnya aluminium karena ringan dan ekonomis.
- Isolator: Mencegah hubung singkat ke tanah dan menahan beban mekanis.
- Kawat Tanah: Melindungi konduktor dari sambaran petir.
- Sistem Pentanahan: Menyalurkan arus petir ke tanah dengan resistansi rendah

Tabel 1. Standar resistansi tanah kaki tower

Tegangan Operasi	Standar
70kV	$\leq 5 \Omega$
150kV	$\leq 10 \Omega$
275kV/500kV	$\leq 15 \Omega$

- Aksesoris: Clamps, spacers, dampers, arcing horns, dll.
- Fungsi Utama: Menjamin kontinuitas dan keandalan transmisi listrik skala besar.

b. Fenomena Petir

Petir adalah pelepasan muatan listrik alami di atmosfer akibat proses elektrostatik dari badai guntur, yang menghasilkan cahaya dan radiasi elektromagnetik. Perbedaan

kecepatan cahaya dan suara menyebabkan jeda antara kilatan dan suara guntur, tipe petir antarlain :[2]

1. Petir awan ke tanah (Cloud-to-Ground/CG).
2. Petir dalam awan (Intra-Cloud/IC).
3. Petir awan ke awan (Cloud-to-Cloud/CC).
4. Petir awan ke udara (Cloud-to-Air/CA).

c. Lompatan Api Balik / *Back Flashover (BFO)*

Sambaran petir pada menara transmisi atau kawat tanah dapat menyebabkan back flashover, yaitu kegagalan isolasi udara akibat lonjakan tegangan sangat tinggi pada menara. Besarnya tegangan yang timbul pada isolator dipengaruhi oleh kecuraman, puncak, dan waktu muka gelombang dari petir



Gambar 3. *Back flashover* pada isolator

d. Parameter Petir

Parameter petir yang digunakan antara lain:

- Arus puncak (I)

Arus puncak petir (peak current) adalah arus maksimum dari sambaran balik (return stroke) [3] Arus ini dibedakan berdasarkan polaritas (negatif atau positif) serta jenis sambaran, yaitu sambaran pertama (first stroke) dan sambaran susulan (subsequent stroke).

- Kecuraman arus (di/dt)

Kecuraman arus (di/dt) adalah laju perubahan arus terhadap waktu hingga mencapai puncak, yang umumnya didekati dengan rasio arus puncak terhadap waktu pencapaiannya [3]. Nilai ini digunakan dalam perhitungan tegangan impuls petir pada tower dengan model EMT (Electromagnetic Transients) sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{(1 + (I/31)^{2.6})} \quad (1)$$

$$di/dt = 24 \times 10^{(\log(\frac{1-P}{P})/4)/2.303} \quad (2)$$

dimana

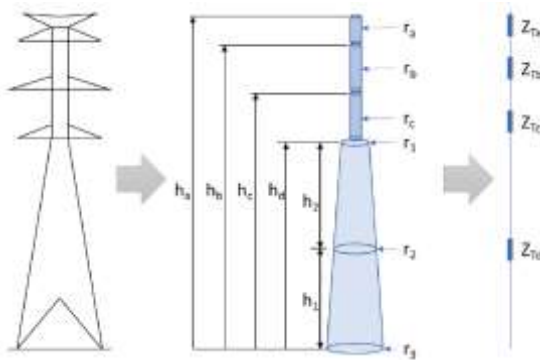
P : probabilitas (%)

I : arus puncak petir (A)

di/dt : kecuraman arus (kA/us)

e. Impedansi dan Induktansi Tower SUTET

Tegangan impuls petir yang terjadi pada suatu struktur akan berbanding lurus dengan arus petir dan impedansi yang terbaca oleh arus tersebut. Impedansi ini disebut impedansi surja.[4]



Gambar 4. Variabel impedansi pada tower saluran transmisi

Persamaan untuk menghitung impedansi tower saluran transmisi dapat menggunakan model pendekatan 4 jenis tower pada gambar 5.[4]

Cylindrical	Conical	West	Portal
$Z_0 = 60 \left[\ln \left(\frac{H}{r_0} \right) - 1 \right]$	$Z_0 = 60 \left[\ln \left(\frac{H}{r_0} \right) \right]$	$Z_0 = 60 \left[\ln \left(\frac{H}{r_0} \right) \right]$	$Z_0 = \frac{Z_1 + Z_2}{2}$
$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r_0}{H} \right)$		$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r_0}{H} \right)$	$Z_1 = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{H}{r_0} \right) - 1 \right]$
		$Z_{\text{top}} = \frac{r_0 H_1 + r_0 H_2 + r_0 H_3}{H_1}$	$Z_2 = \frac{d^2 \ln \left(\frac{2H}{d} \right) + H_1 \cdot Z_1}{H_1 + d}$
$r_0 = \frac{H_1}{\ln 2}$: towers with crossarms or $r_0 = \frac{H_1}{c}$: towers without crossarms			$H_1 = \frac{1}{c} \frac{H_1 \cdot Z_1 \cdot (d + H_1) - Z_2}{c \cdot Z_1 H_1 \cdot Z_1 + (d + H_1) \cdot Z_1}$

Gambar 5. Impedansi tower berdasarkan model tower

dimana

- h1 : tinggi tower dari kaki tower hingga traves bawah
- h2 : tinggi dari traves bawah ke atas tower
- r1 (atas) : radius body tower pada atas tower
- r2 : radius body tower (tengah) pada tengah tower
- r3 : radius body tower (bawah) pada bawah tower atau kaki tower
- Z_T : nilai impedansi surja tower (Ω)

Berdasarkan [4] representasi paling sederhana dari sebuah tower dalam studi petir adalah memodelkannya sebagai induktor murni dengan nilai induktansi yang dihitung sebagai berikut:

$$L_T = \frac{Z_T}{c} \times H_t \quad (3)$$

dimana

- Z_T : nilai impedansi surja tower (Ω)
- c : kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)
- H_T : tinggi total tower (m)
- L_T : nilai induktansi total tower (μH)

f. Tegangan Impuls Petir Pada SUTET

Untuk memperoleh estimasi tegangan impuls akibat petir yang realistis, berdasarkan [4] pendekatan melalui model elektrik di mana tower saluran transmisi diperkirakan memiliki induktansi (L_T) sebesar 0,5 hingga 1,0 $\mu\text{H}/\text{meter}$ tinggi tower dan elektroda tanah yang dimodelkan sebagai sebuah resistansi (R_e). Maka kenaikan tegangan impuls pada tower saluran transmisi saat terjadi sambaran petir dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$U_t = R_e \cdot I + L_T \cdot di/dt \quad (4)$$

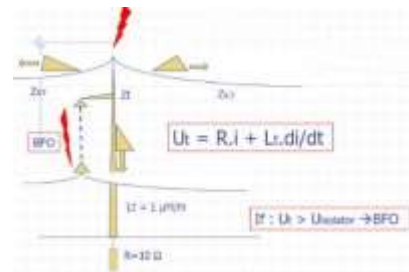
dimana

- U_t : Tegangan impuls (V)
 R_e : Resistansi kaki tower (Ω)
 I : Arus puncak petir (A)
 L_T : Induktansi total tower ($\mu\text{H}/\text{m}$)
 di/dt : Kecuraman arus (kA/us)

g. Tingkat Isolasi SUTET

Bagian paling rentan terhadap sambaran petir adalah isolator tower. Saluran udara menggunakan berbagai bentuk dan material isolasi dengan kekuatan berbeda, yang dinyatakan dalam Basic Impulse Insulation Level (BIL)—tegangan impuls maksimum yang dapat ditahan isolator dengan tingkat keberhasilan

90%. Sambaran langsung pada menara dapat meningkatkan tegangan impuls; jika melebihi BIL, terjadi back flashover (BFO) yang memicu gangguan transmisi dan berpotensi menyebabkan pemadaman listrik [5]



Gambar 6. Ilustrasi *back flashover* (bfo) isolator

h. Kerapatan Petir

Kerapatan petir menunjukkan frekuensi sambaran petir di suatu wilayah dalam periode tertentu, dihitung sebagai jumlah sambaran per luas area. Semakin tinggi kerapatan, semakin sering sambaran terjadi[6]. Daerah dikategorikan rawan petir jika memiliki:

- Tingginya jumlah kejadian sambaran,
- Potensi korban atau kerugian besar,
- Kepadatan bangunan tinggi[7].

$$Ng = \frac{N}{A} \quad (5)$$

Dimana Ng = kerapatan petir (sambaran/ km^2/tahun), N = jumlah sambaran petir ke tanah dalam

setahun dan A = luas wilayah pengamatan (km^2)

Penentuan tingkat kerawanan sambaran petir tiap tower SUTET ditetapkan sebanyak 3 tingkat kategori yaitu rendah, sedang dan tinggi. Interval pada tiap kategori dapat ditentukan tergantung nilai yang didapat dari rata-rata kerapatan sambaran petir pada tiap tower SUTET.

i. Metode Monte Carlo

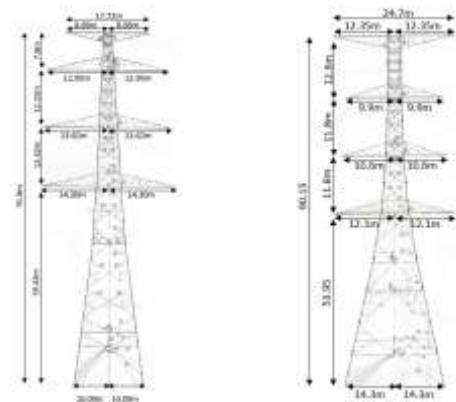
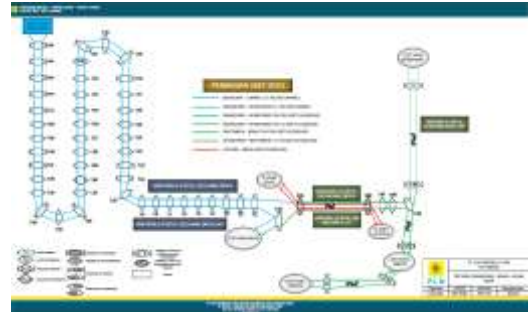
Probabilitas adalah nilai kebolehjadian suatu peristiwa. Metode Monte Carlo merupakan algoritma komputasi berbasis simulasi untuk memodelkan perilaku sistem fisika atau matematika, terutama digunakan untuk menghitung integral kompleks dan multidimensi.

Dalam analisis keandalan sistem, Monte Carlo menggunakan random sampling dari distribusi kegagalan dan perbaikan komponen untuk memprediksi reliability dan availability. Proses ini dilakukan melalui model matematis yang dijalankan dalam program komputer, sehingga dapat menilai parameter sistem secara akurat[8]

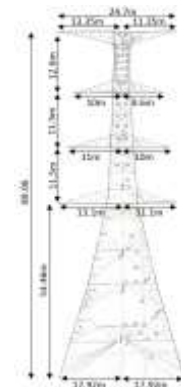
C. Hasil dan Pembahasan

Data spesifikasi teknis SUTET 500kV Cawang Baru – Bekasi menjadi

salah satu komponen penting yang mencakup informasi teknis seperti level tegangan operasi, kapasitas daya hantar, jenis konduktor yang digunakan, serta tipe menara dan isolator yang dipasang.



Tower type AA Tower type BB/CC



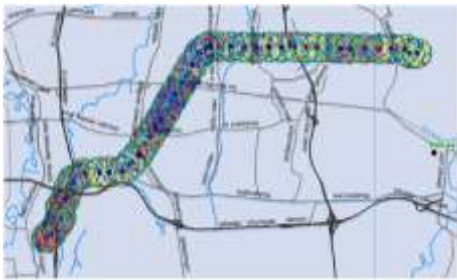
Tower type DD/EE/FF

Gambar 7. Tipikal tower

500kV SUTET Cawang Baru-Bekasi

Data sambaran petir merupakan salah satu komponen utama dalam

penelitian ini. Data sambaran petir pada SUTET 500kV Cawang Baru – Bekasi yang akan digunakan adalah data sambaran yang di peroleh dari rekaman lightning detector yang dimiliki dan dioperasikan oleh PT PLN (Persero) yaitu Fault Analysis and Lightning Location Software (FALLS).



Gambar 7. Visual historis sambaran petir tahun 2018 – 2024

1. Probabilitas Sambaran Petir

Sebelum melakukan simulasi Monte Carlo untuk menentukan nilai probabilitas jumlah sambaran petir, kerapatan (*density*) petir dan arus sambaran petir, dicari terlebih dahulu nilai distribusi probabilitas, distribusi kumulatif dan interval angka acak untuk setiap pada masing-masing tower menggunakan data diatas.



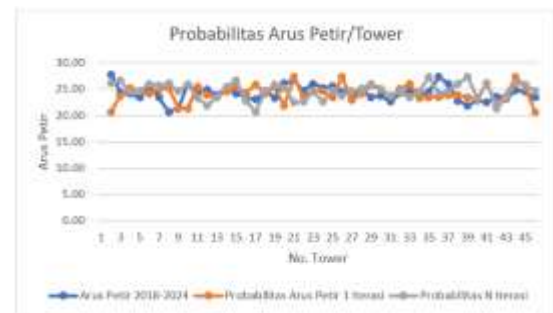
Gambar 8. Probabilitas sambaran petir/tower/tahun

2. Probabilitas Kerapatan Petir



Gambar 9. Probabilitas kerapatan petir/tower/tahun

3. Probabilitas Arus Petir



Gambar 10. Probabilitas arus petir/tower/tahun

4. Tingkat Kerawanan Petir Berdasarkan Simulasi Monte Carlo

Kerawanan sambaran petir pada SUTET 500 kV dianalisis menggunakan perhitungan probabilitas sambaran dan kerapatan (*density*) petir. Kerapatan petir menunjukkan frekuensi sambaran di suatu wilayah dalam periode tertentu. Tingginya jumlah kejadian sambaran menjadi indikator kerawanan. Nilai probabilitas dan kerapatan ini digunakan sebagai dasar penentuan tingkat kerawanan sambaran petir

pada SUTET 500 kV, adapun pada Cawang baru di tetapkan 3 kategori.



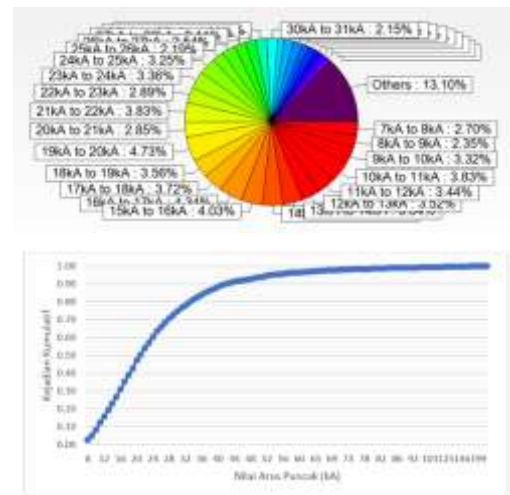
Gambar 11. Persentase tingkat kerawanan petir

5. Kecuraman Arus Petir

Berdasarkan data historis sambaran petir pada SUTET 500 kV Cawang Baru – Bekasi untuk periode 2018–2024, diperoleh temuan sebagai berikut:

1. Total kejadian sambaran petir sebanyak 2.674, terdiri dari 2.557 kejadian dengan polaritas negatif dan 117 kejadian dengan polaritas positif.
2. Proporsi sambaran petir berpolaritas negatif mencapai 95,62%.
3. Arus puncak minimum tercatat sebesar 8 kA (68 kejadian).
4. Arus puncak modus berada pada 20 kA (121 kejadian).
5. Arus puncak maksimum mencapai 220 kA (1 kejadian).
6. Rata-rata arus puncak adalah 24,35 kA.

Persentase kumulatif arus puncak dapat dilihat pada Gambar 4.9, di mana distribusi kejadian tertinggi (gradien paling curam) berada pada arus di bawah 40 kA. Secara kumulatif, sambaran dengan arus puncak ≤ 40 kA mencakup 86,9% kejadian, sedangkan ≥ 40 kA hanya 13,10%.



Gambar 12. Persentase kumulatif kejadian arus puncak petir

Perhitungan kecuraman arus petir menggunakan arus puncak petir minimum, maksimum, rata-rata dan modus sesuai dengan persamaan (1) dan (2)

- a. Kecuraman arus petir minimum 8kA

$$P = \frac{1}{(1 + (I/31)^{2,6})} = \frac{1}{(1 + (8/31)^{2,6})}$$

$$= 0,971302$$

$$di/dt = 24 \times 10^{(\log(\frac{1-P}{P})/4)/2,303}$$

$$di/dt = 24 \times 10^{(\log(\frac{1-0,971302}{0,971302})/4)/2,303)} \\ = 16,37 \text{ kA/us}$$

Kecuraman arus petir minimum 8kA didapatkan 16,37 kA/us

- b. Kecuraman arus petir maksimum 220kA didapatkan 40,62 kA/us
- c. Kecuraman arus petir rata-rata 24,35kA didapatkan 22,42kA/us
- d. Kecuraman arus petir modus 20kA didapatkan 21,21 kA/us

6. Impedansi Tower dan Induktansi Total Tower

Untuk menghitung impedansi tower menggunakan model pendekatan jenis tower Waist berdasarkan [4] dan induktansi total tower menggunakan persamaan (3) serta disesuaikan dengan spesifikasi data geometris tipe tower tipikal pada SUTET 500kV Cawang Baru – Bekasi yang terdiri dari tower tipe AA, tower tipe BB/CC dan tower tipe DD/EE/FF. Dengan menggunakan excel didapatkan perhitungan impedansi tower dan induktansi total tower sebagai berikut:

Tabel 2. Impedansi tower dan induktansi total tower

Tower Tipikal	$Z_T = 60 \left\{ \ln \left[\cot \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \right\}$	$L_T = \frac{Z_T}{c} \times H_t$
Tower tipe AA	$Z_T = 123,19 \Omega$	$L_T = 44 \mu\text{H}$ $L_{T/m} = 0,48 \mu\text{H/m}$

Tower tipe BB/CC	$Z_T = 118,26 \Omega$	$L_T = 42 \mu\text{H}$ $L_{T/m} = 0,46 \mu\text{H/m}$
Tower tipe DD/EE/FF	$Z_T = 110,06 \Omega$	$L_T = 38 \mu\text{H}$ $L_{T/m} = 0,43 \mu\text{H/m}$

7. Kenaikan Tegangan Impuls Sambaran Petir

Perhitungan kenaikan tegangan impuls akibat sambaran petir pada tower SUTET 500 kV Cawang Baru–Bekasi dilakukan menggunakan Persamaan (4). Analisis dilakukan untuk setiap tipe tower tipikal dengan asumsi resistansi pentanahan $\leq 15 \Omega$. Probabilitas arus puncak petir diambil pada nilai rata-rata 24,35 kA dan 40 kA, karena 86,9% kejadian kumulatif petir berada pada arus puncak ≤ 40 kA. Selain itu, arus puncak maksimum yang digunakan dalam perhitungan adalah 220 kA.

a. Tower tipe AA

Tegangan impuls (kV)	Nilai Resistansi Tanah (Ω)			
	15	10	5	1
Traves GSW	5,13	4,03	2,93	2,05
Traves Atas	4,98	3,88	2,78	1,90
Traves Tengah	4,73	3,63	2,53	1,65
Traves Bawah	4,49	3,39	2,29	1,41
Kaki	3,30	2,20	1,10	220

Berdasarkan hasil perhitungan, kenaikan tegangan impuls akibat sambaran petir pada tower tipe AA menunjukkan bahwa pada arus

puncak ≤ 40 kA dan resistansi pentanahan $\leq 15 \Omega$ tidak terjadi back flashover (BFO), karena tegangan impuls yang timbul masih berada di bawah Basic Impulse Insulation Level (BIL) untuk 30 keping isolator, yaitu sekitar 3600 kV. Sebaliknya, pada arus puncak 220 kA dengan resistansi pentanahan $\geq 10 \Omega$, terjadi back flashover karena tegangan impuls melebihi nilai BIL.

b. Tower tipe BB/CC

Tegangan impuls (kV)	Nilai Resistansi Tanah (Ω)			
	15	10	5	1
Traves GSW	5,03	3,93	2,83	1,95
Traves Atas	4,78	3,68	2,58	1,70
Traves Tengah	4,56	3,46	2,36	1,48
Traves Bawah	4,33	3,23	2,13	1,25

Berdasarkan hasil perhitungan, tegangan lebih akibat sambaran petir pada tower tipe BB/CC menunjukkan bahwa pada arus puncak ≤ 40 kA dan resistansi pentanahan $\leq 15 \Omega$ tidak terjadi back flashover (BFO), karena kenaikan tegangan masih berada di bawah Basic Impulse Insulation Level (BIL) untuk 30 keping isolator, yaitu sekitar 3600 kV. Sebaliknya, pada arus puncak 220 kA dengan resistansi pentanahan $\geq 10 \Omega$, terjadi back flashover karena tegangan impuls melebihi nilai BIL.

c. Tower tipe DD/EE/FF

Tegangan impuls (kV)	Nilai Resistansi Tanah (Ω)			
	15	10	5	1
Traves GSW	4,89	3,79	2,69	1,81
Traves Atas	4,67	3,57	2,47	1,59
Traves Tengah	4,46	3,36	2,26	1,38
Traves Bawah	4,25	3,15	2,05	1,17
Kaki	3,30	2,20	1,10	220

Berdasarkan perhitungan tegangan lebih atau impuls sambaran petir pada tower tipe BB/CC didapatkan pada arus puncak petir ≤ 40 kA dan nilai resistansi pentanahan tower $\leq 15 \Omega$ tidak menyebabkan *back flashover (bfo)* karena nilai kenaikan tegangan yang terjadi masih berada dibawah nilai *Basic Impule Insulation Level (BIL)* dari 30 keping isolator, yaitu sekitar 3600 kV. Pada arus puncak petir 220 kA dan nilai resistansi pentanahan tower $\geq 15 \Omega$ maka menyebabkan *back flashover (bfo)* karena nilai kenaikan tegangan yang terjadi berada diatas nilai *Basic Impule Insulation Level (BIL)*.

8. Analisis Identifikasi dan Mitigasi Risiko Sambaran Petir.

Berdasarkan hasil perhitungan kenaikan tegangan impuls akibat dari sambaran petir pada tower SUTET 500kV Cawang Baru – Bekasi menggunakan persamaan (4) pada masing-masing tipe tower ditemukan

3 faktor perhitungan yang sangat mempengaruhi performa SUTET menyebabkan back flashover (bfo) pada isolator tower yaitu arus puncak sambaran petir, nilai resistansi pentanahan tower dan nilai induktansi tower. Dari ketiga faktor tersebut dapat dilakukan indentifikasi dan mitigasi risiko yang bertujuan untuk meningkatkan performa SUTET 500kV Cawang Baru – Bekasi.

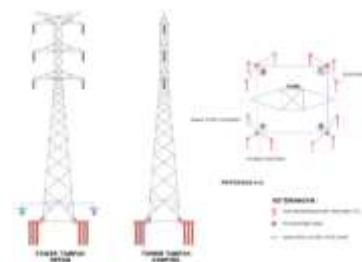
Tabel 3. Indentifikasi dan mitigasi risiko sambaran petir pada SUTET

Identifikasi Risiko			
Deskripsi Risiko	Penyebab	Dampak	Mitigasi Risiko
Gangguan (SUTET) oleh petir (back flash over (bfo))	<p><i>Controllable:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Nilai resistansi pentanahan tower SUTET. • Nilai induktansi tower SUTET atau <i>lightning distribution</i> pada tower SUTET. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pemasangan pemadaman listrik. • Kerusakan pada isolator tower. • Pemasangan perusakan berkursang. • Citra perusakan 	<p>Pencegahan (Penyebab):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Melakukan inspeksi dan assesmen rutin pada peralatan tower SUTET. • Melakukan improvement dari segi desain dan material pentanahan, serta

<i>Uncontrollable:</i>	Intensitas petir yang tinggi pada ruas atau segmen tertentu.	<p>Lightning distribution pada tower SUTET.</p> <p>Pemulihan (Dampak):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Menurunkan gangguan oleh petir. 2. Menjaga keandalan sistem.
------------------------	--	---

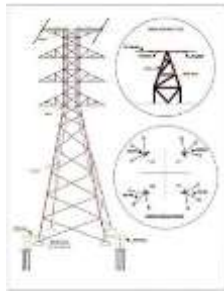
Berdasarkan Tabel 3 *back flashover (bfo)* pada SUTET 500kV Cawang Baru – Bekasi dapat dihindari. Hal ini dimungkinkan karena penyebabnya bersifat *controllable* atau dapat dikendalikan yaitu dengan melakukan perbaikan pada sistem pentanahan tower dan *lightning distribution* tower. Berikut adalah perbaikan yang dapat diambil untuk mencegah *back flashover (bfo)* :

- Pemasangan Multi Rod Grounding (MRG)



Gambar 13. Desain Multi Rod Grounding (MRG)

- Pemasangan Multi Direct Grounding (MDG)



**Gambar 14. Desain Multi Direct
Grounding (MDG)**

Berdasarkan [9] tower yang dilengkapi dengan kawat penyangga (guy wire) yang dapat menghantarkan atau mendistribusikan sebagian arus lonjakan sambaran petir. Desain Multi Direct Grounding (MDG) ini merupakan salah satu alternatif yang berkontribusi dalam mengurangi total induktansi tower sehingga dapat menurunkan tegangan impuls saat terjadi sambaran petir.

9. Analisis Keputusan

Dari simulasi perhitungan dan analisis risiko diatas maka disusun analisis keputusan untuk meningkatkan performa SUTET 500kV Cawang Baru – Bekasi dengan rekomendasi sebagai berikut:

Tabel 4. Analisa Keputusan

Tingkat Kerawanan SUTET	Nilai resistansi tanah >5	Nilai resistansi tanah <5
Tinggi	MRG & MDG	Pengamatan dan evaluasi berkala

Sedang	MRG	Pengamatan dan evaluasi berkala
Rendah	Pengamatan dan evaluasi berkala	Pengamatan dan evaluasi berkala

D. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan probabilistik Monte Carlo efektif untuk memodelkan probabilitas sambaran petir pada SUTET 500 kV Cawang Baru–Bekasi dengan memanfaatkan data historis 2018–2024. Simulasi menghasilkan tingkat akurasi yang baik, ditunjukkan oleh nilai MAPE 14% untuk probabilitas sambaran, 12% untuk kerapatan petir, dan 7% untuk arus sambaran. Temuan ini menjawab tujuan penelitian terkait pemodelan risiko sambaran petir dan klasifikasi tingkat kerawanan tower (rendah, sedang, tinggi).

Selain itu, penelitian mengidentifikasi bahwa kenaikan tegangan impuls berperan signifikan terhadap kemungkinan back flashover (BFO), yang dipengaruhi oleh tiga faktor utama: arus petir, resistansi tanah, dan induktansi tower. Secara praktis, hasil ini menegaskan tanggung jawab dalam meningkatkan keandalan sistem transmisi melalui penerapan solusi teknis seperti Multi Rod

Grounding dan Multi Direct Grounding pada tower berkerawanan tinggi. Implikasi teoritis memperkuat penggunaan pendekatan probabilistik berbasis data historis dalam analisis risiko kelistrikan. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan pada cakupan data hingga 2024 dan belum mempertimbangkan variabel lingkungan lainnya. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas periode data, mengintegrasikan faktor meteorologis, serta menguji efektivitas solusi teknis di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- | | |
|---|---|
| <p>[1] Y. K. Putra, "ANALISIS KEMAMPUAN PENTANAHAN MENARA SUTT TERHADAP SAMBARAN PETIR LANGSUNG YANG MENGAKIBATKAN BACKFLASHOVER PADA SALURAN TRANSMISI 150 KV PONOROGO – MANISREJO," <i>Institut Teknologi Nasional Malang</i>, 2017.</p> <p>[2] Y. Cecilia, "Analisis Kerapatan Sambaran Petir Wilayah Provinsi Banten Periode Juli 2020-Juni 2021," <i>Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang</i>, 2022.</p> <p>[3] A. R. Hileman, <i>Insulation Coordination for Power</i></p> | <p><i>Systems</i>, vol. 19, no. 9. 1999. doi: 10.1109/MPER.1999.785802.</p> <p>[4] CIGRE, "TB 839 - Procedures for estimating the lightning performance of transmission lines – new aspects Executive," <i>Cigre C4</i>, no. June, hlm. 435–479, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-44484-6_13.</p> <p>[5] R. Zoro, <i>Sistem Proteksi Petir Pada Sistem Tenaga Listrik</i>, 1 ed. Bandung: PT. Remaja Rosdakarya, 2019.</p> <p>[6] R. Hardiana dan M. Arsyad, "Analisis Kerapatan Sambaran Petir di Kawasan Karst Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung," <i>Universitas Negeri Makassar</i>, hlm. 98–101, 2020.</p> <p>[7] K. N. S. Tomy Gunawa, "ANALISIS TINGKAT KERAWANAN BAHAYA SAMBARAN PETIR DENGAN METODE SIMPLE ADDITIVE WEIGHTING DI PROVINSI BALI," <i>Universitas Udayana</i>, hlm. 1–12, 2013.</p> <p>[8] R. Oktavian, "Analysis of Power System Reliability in Bali Region 150Kv Power System Using Monte Carlo Method," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.</p> <p>[9] CIGRE, "Technical Brochure 063 - GuideGuide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," <i>Cigre Wg C4.23</i>, vol. 01, no. October, hlm. 64, 2020.</p> |
|---|---|