

OPTIMALISASI SISTEM PENTANAHAN UNTUK MENGURANGI *BACK FLASHOVER* AKIBAT SAMBARAN PETIR PADA TOWER SUTT PENGHANTAR SENTUL - CIBINONG

Tun Sri Rajunul Muha, Yusreni Warmi, Zulkarnaini, Arfita Yuana Dewi dan Erhanelli

Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Padang
Jl. Gajah Mada Jl. Kandis Raya, Kp. Olo, Kec. Nanggalo, Kota Padang, Sumatera Barat 25173, Indonesia

^{*)}E-mail: 2023310051.tun@itp.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak perbaikan sistem grounding terhadap tegangan crossarm dan potensi terjadinya *back flashover* pada jaringan transmisi tenaga listrik. Pada kondisi awal, resistansi pentanahan mencapai 33,2 Ω , yang melebihi standar IEEE Std 80-2000, dengan arus sambaran diasumsikan antara 20 kA hingga 80 kA. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan crossarm mencapai 1493,715 kV, melebihi batas tegangan lompat api sebesar 1440,439 kV. Setelah dilakukan perbaikan dengan menambah panjang elektroda pentanahan, resistansi menurun menjadi 7,489 Ω secara simulasi dan 5,20 Ω di lapangan. Tegangan *crossarm* turun menjadi 1438,829 kV dan 1433,947 kV, mendekati atau di bawah tegangan lompat api. Hasil ini menunjukkan bahwa perbaikan grounding efektif dalam menurunkan risiko *back flashover*, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem transmisi tenaga listrik.

Kata kunci: Gangguan Petir, Back Flashover, Tower SUTT, Pentanahan.

Abstract

This study aims to analyze the impact of grounding system improvements on crossarm voltage and the potential occurrence of back flashover in power transmission networks. Initially, the grounding resistance reached 33.2 Ω , exceeding the IEEE Std 80-2000 standard, with the lightning strike current assumed to range between 20 kA and 80 kA. Simulation results show that the crossarm voltage reached 1493.715 kV, exceeding the flashover voltage threshold of 1440.439 kV. After improvements were made by extending the grounding electrode, the resistance decreased to 7.489 Ω in simulations and 5.20 Ω in the field. The crossarm voltage decreased to 1438.829 kV and 1433.947 kV, approaching or falling below the flashover voltage threshold. These results indicate that grounding improvements are effective in reducing the risk of back flashover, thereby enhancing the reliability of the power transmission system.

Keywords: Lightning Disturbance, Back Flashover, Transmission Tower, Grounding.

1. Pendahuluan

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan listrik, sistem tenaga listrik yang andal dan optimal sangat dibutuhkan dewasa ini. Penyaluran energi listrik dari pembangkit ke konsumen dilakukan melalui jaringan transmisi dan distribusi yang terdiri dari berbagai komponen, termasuk Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET). Dalam proses transmisi ini, jalur SUTT dan SUTET sering melewati wilayah yang memiliki tingkat aktivitas petir tinggi, yang berpotensi menimbulkan gangguan terutama akibat sambaran langsung [1], [2].

Petir adalah fenomena alam yang bersifat acak dan tidak dapat diprediksi kapan terjadinya [1]. Terdapat dua jenis sambaran petir, yaitu sambaran langsung dan sambaran tidak langsung. Intensitas sambaran petir di suatu wilayah

dapat dilihat dari nilai Iso Keraunic Level (IKL), yang menunjukkan jumlah hari terjadinya petir dalam setahun. Berdasarkan data BMKG, wilayah Jawa Barat pada tahun 2024 memiliki nilai IKL yang tergolong tinggi, sehingga dari nilai ini meningkatkan risiko gangguan pada sistem tenaga listrik [3].

Sambaran petir yang mengenai sistem transmisi listrik dapat mengakibatkan lonjakan tegangan yang berpotensi merusak peralatan jika tidak segera ditangani. Lonjakan tegangan ini bersifat sementara (transien) dan dapat terjadi dalam waktu singkat sebelum sistem kembali ke kondisi normal. Salah satu gangguan eksternal yang sering terjadi akibat petir adalah fenomena *back flashover*, yang dapat terjadi jika tegangan pada isolator melebihi batas tegangan lompatan api (*Voltage Flashover* atau *VFO*) [1], [4].

Gangguan akibat sambaran petir telah menjadi salah satu penyebab utama gangguan transmisi di berbagai wilayah, termasuk di jaringan transmisi PT PLN (Persero) Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk Bogor. Penelitian ini berfokus pada jaringan SUTT 150 kV Transmisi Sentul – Cibinong, khususnya di menara-menara transmisi yang berada di wilayah dengan tingkat keaktifan petir yang tinggi [3]. Salah satu gangguan yang diakibatkan oleh sambaran petir adalah kasus *flashover* yang ditemukan di sisi *cold* pada isolator Tower 31 SUTT Penghantar Sentul – Cibinong, yang merupakan tower tipe suspension.



Gambar 1. Isolator Flashover

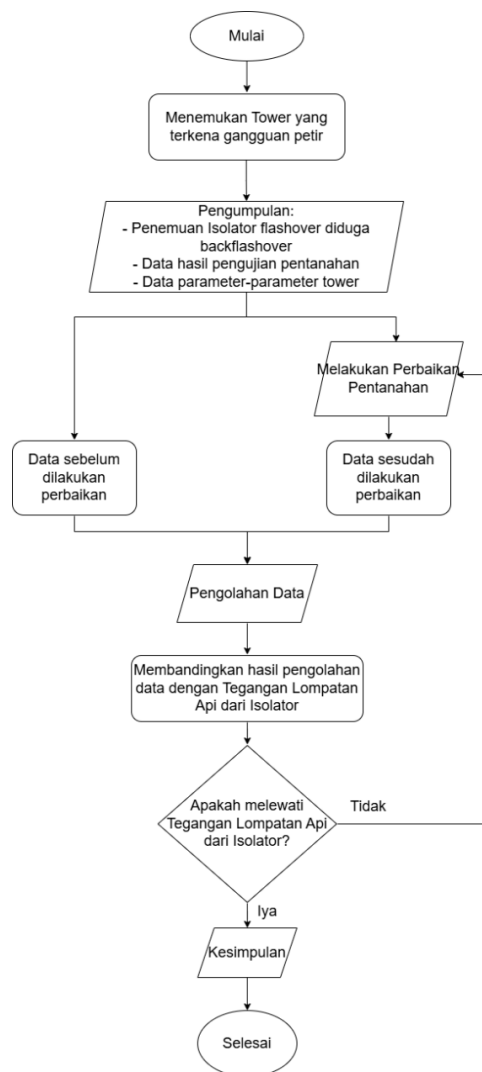
Investigasi terhadap gangguan ini dilakukan dalam kondisi darurat, sehingga untuk menjaga keandalan sistem transmisi, Tim Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) melakukan penggantian isolator guna mencegah gangguan berulang. Berdasarkan data gangguan transmisi di PLN UPT Bogor dari tahun 2018 hingga 2024, petir menjadi penyebab dominan terjadinya gangguan, khususnya yang mengakibatkan *back flashover* [5], [6].

Peningkatan kebutuhan listrik di wilayah Sentul – Cibinong sejalan dengan tantangan dalam menjaga keandalan sistem transmisi terhadap risiko sambaran petir. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor yang berkontribusi terhadap terjadinya *back flashover*, serta mengevaluasi solusi teknis yang dapat diterapkan untuk mitigasi risiko pada Tower SUTT Sentul – Cibinong [5], [7], [8], [9]

2. Metode

2.1. Langkah Penelitian

Adapun untuk Flowchart penyelesaian masalah dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 2. Flowchart metode penelitian untuk mendapatkan perbandingan tegangan lompatan api dari isolator

Terdapat beberapa metode yang diterapkan sebagai dasar metodologi penelitian dalam melakukan penelitian tugas akhir. Objek penelitian meliputi [10], [11], [12]:

1. Menghitung tegangan lompatan api dari Isolator
2. Menghitung Impedansi Surja Menara, Surja Kawat Tanah, Instrinsik dan Gelombang menara
3. Menghitung faktor redaman
4. Menghitung waktu Rambat Gelombang dari Puncak ke Dasar menara dan dari Puncak ke *Crossarm*.
5. Menghitung Tegangan Puncak Menara
6. Menghitung Tegangan Dasar Menara
7. Menghitung Tegangan *Crossarm*
8. Menguak fenomena *Back Flashover*
9. Menghitung nilai pentanahan dengan penambahan panjang elektroda
10. Membandingkan nilai Tegangan Menara yang memiliki nilai Pentanahan sebelum dan sesudah penambahan panjang elektroda.

2.2. Data Pengujian Nilai Pentanahan SUTT Sentul – Cibinong

Berikut ini adalah data dari hasil pengukuran nilai pentanahan Tower SUTT Penghantar Sentul – Cibinong menggunakan alat uji pentanahan Fluke 1625-2. Di mana data yang diberi *shading* berwarna merah merupakan data tower yang terjadi *flashover*. Sementara data pentanahan yang lain merupakan sample data pentanahan tower yang diambil dari titik terdekat terjadinya gangguan [6]

Tabel 1. Hasil uji pentanahan tower SUTT Sentul – Cibinong

Data Tower	Hasil Pentanahan (Ω)			
	Leg A	Leg B	Leg C	Leg D
Tower 28	2,91	2,86	3,35	2,99
Tower 29	1,4	1,61	1,48	2,62
Tower 30	3,51	5,55	3,87	3,81
Tower 31	8,86	16,47	16,18	32,2
Tower 32	4,98	3,55	3,6	5,2
Tower 33	6,47	4,46	7,5	8,64

2.3. Data Tower Gangguan SUTT Sentul – Cibinong

Transmisi 150 kV Sentul – Cibinong merupakan bagian dari sistem interkoneksi dengan ditopang oleh menara sebanyak 62 unit. Dimulai dari GI Bogor Baru (T.1 – T.27) dan dilanjutkan dari GI Sentul ke GI Cibinong (T.28 – T.62). Transmisi ini menggunakan saluran ganda dengan nilai resistansi tower rata-rata 2,24 ohm [5]. Untuk parameter tower dapat dilihat pada Gambar 3.

Adapun data elektrik kabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperti Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3.

Tabel 2. Spesifikasi kawat tanah

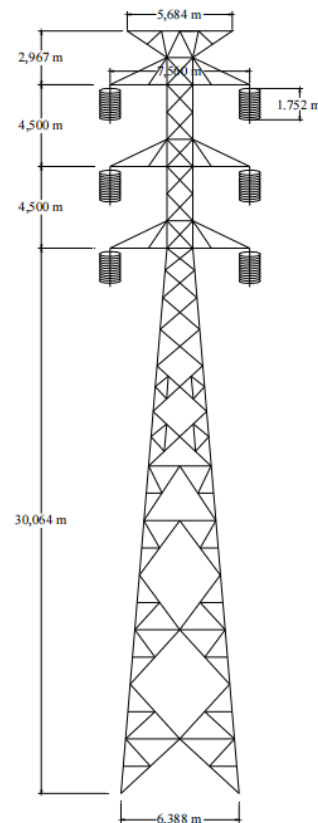
Material	Jumlah (buah)	Diameter (mm)	Radius (mm)
Galvanized Steel Wired	2	9,6	4,8

Tabel 3. Spesifikasi kawat konduktor

Material	Diameter (mm)	Radius (mm)	Berat Konduktor (kg/m)	Tegangan Mendatar (kg)
ACSR 240 mm ²	21,9	10,95	0,987	8640

Tabel 4. Spesifikasi Isolator

Material	Panjang Isolator (mm)	Jumlah (buah)	Rentang Panjang Isolator (m)	Basic Impulse Insulation Level (kV)
Keramik	146	12	146 x 12 = 1,752	54,2 kv x 12 = 650



Gambar 3. Model tower SUTT Sentul - Cibinong

2.4. Perhitungan Tegangan Crossarm dengan Mengabaikan Efek Korona

2.4.1 Menghitung Tegangan lompatan api dari isolator

Perhitungan dimulai untuk mengetahui berapa batasan dari lompatan api dari isolator [12]. Di mana nilainya dapat dihitung dengan persamaan (1).

$$V_{fo} = (K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}}) \times 10^3 \text{ kV} \quad (1)$$

Di mana,

$$K_1 = 0,4 \times W$$

$$K_2 = 0,71 \times W$$

$$W = 1,752 \text{ meter}$$

$$t = 2 \mu\text{s}$$

Maka,

$$V_{fo} = \left(0,4 \times W + \frac{0,71 \times W}{t^{0,75}} \right) \times 10^3 \text{ kV}$$

$$V_{fo} = \left(0,4 \times 1,752 + \frac{0,71 \times 1,752}{2^{0,75}} \right) \times 10^3 \text{ kV}$$

$$V_{fo} = \left(0,7008 + \frac{1,24392}{1,6817928} \right) \times 10^3 \text{ kV}$$

$$V_{fo} = (0,7008 + 0,739639) \times 10^3 \text{ kV}$$

$$V_{fo} = 1440,439 \text{ kV}$$

Dari hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan (1), diperoleh nilai batas tegangan kemampuan isolator sebesar 1440,439 kV. Waktu yang digunakan sebesar 2 μ s dipilih karena waktu tersebut menunjukkan persentase terjadinya fenomena yang paling tinggi [12], [13]. Dengan demikian, hasil tegangan yang diperoleh ini akan menjadi acuan sebagai batasan tegangan terjadinya *back flashover* pada isolator. Penetapan batasan ini sangat penting untuk memastikan kinerja isolator dalam menghadapi kondisi tegangan tinggi yang disebabkan oleh sambaran petir, sehingga dapat mengurangi risiko gangguan pada sistem transmisi [9].

2.4.2 Menghitung Impedansi Surja Menara, Surja Kawat Tanah, Instrinsik dan Gelombang Menara

a. Impedansi Surja Menara

$$Z_t = 30 \ln \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \quad (2)$$

Di mana,
 $h = 42,031$ meter
 $2r = 6,388$ meter
 $r = 3,194$ meter

Maka,

$$\begin{aligned} Z_t &= 30 \ln \left[\frac{2(42,031^2 + 3,194^2)}{3,194^2} \right] \\ Z_t &= 30 \ln \left[\frac{2(1766,605 + 10,2016)}{3,194^2} \right] \\ Z_t &= 30 \ln \left[\frac{2(1776,806)}{3,194^2} \right] \\ Z_t &= 30 \ln \left[\frac{3553,612}{10,2016} \right] \\ Z_t &= 30 \ln [348,337] \\ Z_t &= 175,595 \, \Omega \end{aligned}$$

b. Impedansi Surja Kawat Tanah

$$Z_g = 60 \ln \left(\frac{2h_t}{\sqrt{a_{12} r_{gw}}} \right) \quad (3)$$

Di mana,
 $h = 42,031$ meter
 $a_{12} = 2,842$ meter
 $r_{gw} = 0,0048$ meter

Maka,

$$\begin{aligned} Z_g &= 60 \ln \left(\frac{2 \times 42,031}{\sqrt{2,842 \times 0,0048}} \right) \\ Z_g &= 60 \ln \left(\frac{84,062}{\sqrt{0,0136416}} \right) \\ Z_g &= 60 \ln \left(\frac{84,062}{0,116797} \right) \end{aligned}$$

$$Z_g = 60 \ln(719,72739)$$

$$Z_g = 394,73 \, \Omega$$

c. Impedansi Instrinsik

$$Z_I = \frac{Z_g Z_t}{Z_g + 2Z_t} \quad (4)$$

Di mana,

$$Z_g = 394,73 \, \Omega$$

$$Z_t = 175,595 \, \Omega$$

$$Z_I = \frac{394,73 \times 175,595}{394,73 + 2 \times 175,595}$$

$$Z_I = \frac{69.312,61435}{745,92}$$

$$Z_I = 92,9223 \, \Omega$$

d. Impedansi Gelombang Menara

$$Z_w = \left[\frac{2Z_g^2 Z_t}{(2Z_g + Z_t)^2} \right] \left[\frac{Z_t - R}{Z_t + R} \right] \quad (5)$$

Di mana,

$$Z_g = 394,73 \, \Omega$$

$$Z_t = 175,595 \, \Omega$$

$$R = 2,24 \, \Omega$$

Maka,

$$\begin{aligned} Z_w &= \left[\frac{2 \times 394,73^2 \times 175,595}{(2 \times 394,73 + 175,595)^2} \right] \left[\frac{175,595 - 2,24}{175,595 + 2,24} \right] \\ Z_w &= \left[\frac{2 \times 155.811,7729 \times 175,595}{(789,46 + 175,595)^2} \right] \left[\frac{173,355}{177,835} \right] \\ Z_w &= \left[\frac{2 \times 155.811,7729 \times 175,595}{(965,055)^2} \right] [0,974808] \\ Z_w &= \left[\frac{54.719.536,524751}{931.331,153} \right] [0,974808] \\ Z_w &= [58,754] [0,974808] \\ Z_w &= 57,27387 \, \Omega \end{aligned}$$

Setelah melakukan perhitungan dari persamaan (2), (3), (4), (5), maka diperoleh hasil nilai impedansi menara sebesar 175,595 Ω , impedansi surja kawat tanah sebesar 394,73 Ω , impedansi instrinsik sebesar 92,9223 Ω , dan impedansi gelombang menara sebesar 57,27387 Ω (Hutauruk & Ir, 1988).

2.4.3. Menghitung Faktor Redaman

$$\psi = \left[\frac{2Z_t - Z_g}{(2Z_t + Z_g)^2} \right] \left[\frac{Z_t - R_p}{Z_t + R_p} \right] \quad (6)$$

Di mana,

$$Z_g = 394,73 \, \Omega$$

$$Z_t = 175,595 \, \Omega$$

$$R_p = 33,2 \, \Omega$$

Maka,

$$\begin{aligned}\psi &= \left[\frac{2 \times 175,595 - 394,73}{(2 \times 175,595 + 394,73)^2} \right] \left[\frac{175,595 - 33,2}{175,595 + 33,2} \right] \\ \psi &= \left[\frac{351,19 - 394,73}{(351,19 + 394,73)^2} \right] \left[\frac{142,395}{208,795} \right] \\ \psi &= \left[\frac{-43,54}{(745,92)^2} \right] [0,681985] \\ \psi &= \left[\frac{-43,54}{556.396,6464} \right] [0,681985] \\ \psi &= [-0,0000782535] [0,681985] \\ \psi &= -0,000053368\end{aligned}$$

Menggunakan persamaan (6), parameter untuk menghitung faktor redaman diperoleh dari hasil impedansi menara, impedansi surja kawat tanah dan nilai resistansi pentanahan menara [12]. Didapat nilai faktor redaman yaitu -0,000053368. Nilai ini menunjukkan seberapa efektif sistem dalam meredam gelombang surja yang dapat terjadi akibat sambaran petir, dan penting untuk mengevaluasi stabilitas sistem serta keamanan peralatan yang terhubung.

2.4.4. Menghitung Waktu Rambat Gelombang dari Puncak ke Dasar Menara dan dari Puncak ke Crossarm

Untuk mengetahui waktu rambat gelombang dari puncak ke dasar menara dapat dihitung dengan persamaan (7) [12].

$$\tau_T = \frac{h}{300} \mu S \quad (7)$$

Di mana,
h = 42,031 meter

Maka,

$$\begin{aligned}\tau_T &= \frac{42,031}{300} \mu S \\ \tau_T &= 0,14 \mu S \\ \text{Waktu rambat puncak yang menuju ke crossarm dengan persamaan:} \\ \tau_{pn} &= \frac{Y_n}{300} \mu S\end{aligned} \quad (8)$$

Di mana,
 $Y_n = 2,967$ meter

Maka,

$$\begin{aligned}\tau_{pn} &= \frac{2,967}{300} \mu S \\ \tau_{pn} &= 0,00989 \mu S\end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai waktu untuk rambat gelombang dari puncak ke dasar menara yang sebesar 0,14 μs , dan rambat gelombang puncak ke crossarm sebesar 0,00989 μs . waktu rambat gelombang puncak ke crossarm lebih cepat dibanding ke dasar menara, dikarenakan crossarm lebih dekat dari puncak menara [12].

2.4.5. Menghitung Tegangan Puncak Menara

$$V_t = \left[Z_I - \frac{Z_w}{1-\psi} \left(1 - \frac{\tau_T}{1-\psi} \right) \right] \cdot I \quad (9)$$

Di mana,

$$\begin{aligned}Z_I &= 92,9223 \Omega \\ Z_w &= 57,27387 \Omega \\ \tau_T &= 0,14 \mu s \\ \psi &= -0,000053368 \\ I &= 35 \text{ kA}\end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}V_t &= \left[92,9223 - \frac{57,27387}{1+0,000053368} \left(1 - \frac{0,14}{1+0,000053368} \right) \right] \cdot 20 \\ V_t &= [92,9223 - 57,27081(1 - 0,139992)] \cdot 20 \\ V_t &= [92,9223 - 57,27081(0,86)] \cdot 20 \\ V_t &= [92,9223 - 49,2533] \cdot 20 \\ V_t &= 43,66897 \times 20 \\ V_t &= 873,379 \text{ kV}\end{aligned}$$

Tegangan puncak menara disebabkan karena adanya sambaran petir dan arus yang terjadi dan berinteraksi pada besaran impedansi. Dengan asumsi arus petir adalah 20 kA karena persentase sering terjadinya adalah 36% [11], [12]. Sesuai persamaan (9) didapat nilai tegangan puncak menara 873,379 kV.

2.4.6. Menghitung Tegangan Dasar Menara

Guna mengetahui tegangan pada dasar menara, pembiasan pada tahanan kaki Menara harus dihitung dahulu, dengan persamaan (10) [11].

$$\alpha_R = \frac{2R}{Z_t + R} \quad (10)$$

Di mana,
 $Z_t = 175,595 \Omega$
 $R = 33,2 \Omega$

Maka,

$$\begin{aligned}\alpha_R &= \frac{2 \times 33,2}{175,595 + 33,2} \\ \alpha_R &= 66,4208,795 \\ \alpha_R &= 0,318015\end{aligned}$$

Setelah menghitung nilai pembiasan yang bernilai sebesar 0,318. Selanjutnya dilanjutkan menghitung tegangan dasar menara dengan perhitungan persamaan (11) [11].

$$V_R = \alpha_R \cdot Z_I [1 - \psi] - \frac{\tau_T}{1 - \psi} (1 - \psi) V_R = \left[\frac{\alpha_R Z_I}{1 - \psi} \right] \left[1 - \frac{\psi \cdot \tau_T}{(1 - \psi)} \right] \cdot I \quad (11)$$

Di mana,

$$\begin{aligned}\alpha R &= 0,318015 \\ ZI &= 92,9223 \, \Omega \\ \tau T &= 0,14 \, \mu s \\ \psi &= -0,000053368 \\ I &= 20 \, \text{kA}\end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}V_R &= \left[\frac{0,318 \times 92,9223}{1 + 0,000053368} \right] \left[1 - \frac{-0,000053368 \times 0,14}{(1 + 0,000053368)} \right] \cdot 20 \\ V_R &= \left[\frac{29,549}{1,000053368} \right] \left[1 - \frac{-0,00000747}{(1,000053368)} \right] \cdot 20 \\ V_R &= [29,548] [1 + 0,00000747] \cdot 20 \\ V_R &= [29,548] [1,00000747] \cdot 20 \\ V_R &= 29,5479 \times 20 \\ V_R &= 590,9587 \, \text{kV}\end{aligned}$$

2.4.3. Menghitung Tegangan Crossarm

$$V_{pn} = V_R + \tau T - \tau_{pn} \tau T V_T - V_R V_{pn} = V_R + \frac{\tau T - \tau_{pn}}{\tau T} [V_T - V_R] \quad (12)$$

Di mana,

$$\begin{aligned}V_R &= 590,9587 \, \text{kV} \\ \tau_{pn} &= 0,00989 \, \mu s \\ \tau T &= 0,14 \, \mu s \\ V_T &= 873,379 \, \text{kV}\end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}V_{pn} &= 590,9587 + \frac{0,14 - 0,00989}{0,14} [873,379 - 590,9587] \\ V_{pn} &= 590,9587 + \frac{0,13011}{0,14} [282,4203] \\ V_{pn} &= 590,9587 + 0,929357 [282,4203] \\ V_{pn} &= 590,9587 + 262,4692 \\ V_{pn} &= 853,4279 \, \text{kV}\end{aligned}$$

3. Hasil dan Analisa

3.1. Hasil dan Analisa Perhitungan Back Flashover

Dari hasil perhitungan sebelumnya, diperoleh tegangan pada *crossarm* sebesar 853,428 kV. Nilai ini merupakan hasil dari kombinasi antara tegangan menara, tegangan dasar menara, dan waktu rambat gelombang, yang semuanya berkontribusi pada penentuan tegangan yang diterima oleh *crossarm* [11], [12].

Dalam konteks ini, jika tegangan puncak yang terjadi (V_{pn}) sama atau lebih besar dari tegangan flashover (V_{fo}), maka akan berpotensi terjadi fenomena *back flashover*. Ini merupakan kondisi kritis yang perlu diwaspadai, terutama pada Tower 31 SUTT 150 kV Penghantar Sentul – Cibinong yang memiliki nilai tahanan pentanahan sebesar 33,2 Ω . Mengingat bahwa nilai tahanan pentanahan yang lebih tinggi dapat menyebabkan tegangan yang lebih besar

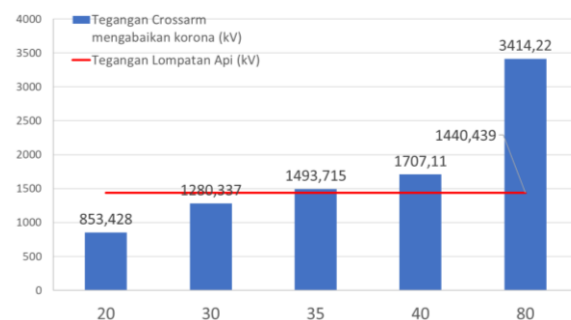
pada sistem, penting untuk memastikan bahwa sistem pentanahan berfungsi dengan baik dan berada dalam batas nilai yang ditetapkan. Jika tidak, hal ini dapat menyebabkan risiko gangguan pada sistem transmisi listrik akibat *back flashover*, yang berpotensi merusak peralatan dan mengganggu pasokan listrik.

Tabel 5. Perhitungan dengan perubahan arus sambaran yang mengakibatkan back flashover

Arus Sambar (kA)	Tegangan Crossarm (kV)	Tegangan Lompatan Api (kV)
20	853,428	
30	1280,337	
35	1493,715	1440,439
40	1707,110	
80	3414,220	

Berdasarkan hasil perhitungan yang tertera dalam Tabel 5, teridentifikasi bahwa nilai tahanan pentanahan sebesar 33,2 Ω dapat mengakibatkan sambaran yang berpotensi menyebabkan terjadinya *back flashover* jika arus sambaran mencapai nilai ≥ 35 kA. Dengan demikian, pada Tower 31 SUTT Penghantar Sentul – Cibinong, terdapat kemungkinan terjadinya isolator flashover.

Sehingga didapatkan Karakteristik hubungan antara Arus Sambar dengan Tegangan *Crossarm* dapat dilihat pada Gambar 4 yang mana nilai dari Tegangan *Crossarm* akan semakin tinggi sebanding dengan nilai besar arus sambar petir.



Gambar 4. Karakteristik Tegangan Crossarm

3.2. Solusi dan Pencegahan dari Back Flashover

Untuk pencegahan *back flashover* dapat dilakukan dengan cara perbaikan nilai pentanahan, perbaikan gap arching horn, pemasangan TLA, serta pemasangan DGS [7], [14]. Namun untuk pencegahan yang paling efisien dan ekonomis pada SUTT adalah dengan dilakukan perbaikan nilai pentanahan, dikarenakan pentingnya kontinuitas penyaluran yang apabila tidak disegerakan akan mengganggu sistem transmisi yang berjalan.

Faktor umur, seperti kerusakan yang disebabkan oleh sambungan baut yang kendur serta korosi pada bagian elektroda, sangat penting untuk diperhatikan dalam

menjaga keandalan sistem grounding. Untuk memastikan kinerja optimal, pengukuran tahanan grounding pada menara harus dilakukan secara berkala dengan metode yang telah dijelaskan sebelumnya. Jika hasil pengukuran menunjukkan nilai tahanan yang tinggi, maka menara tersebut perlu dimasukkan ke dalam daftar perbaikan [10].

Sebagai solusi untuk mengurangi nilai tahanan grounding yang tinggi, beberapa langkah dapat diambil. Pertama, memperdalam batang pentanahan dapat meningkatkan efektivitasnya. Kedua, menambah jumlah batang pentanahan dengan memasang empat batang elektroda tambahan akan membantu memenuhi standar resistansi pentanahan, yaitu $\leq 10 \Omega$ [15]. Dengan langkah-langkah ini, diharapkan sistem pentanahan dapat berfungsi dengan lebih baik, mengurangi risiko kegagalan akibat sambaran petir, serta meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem tenaga Listrik [10].

3.2.1. Menghitung Tahanan Pentanahan Baru Secara Simulasi

Dengan menggunakan persamaan (13) dan menggunakan metoda 4 batang elektroda pada persamaan (14) sehingga nilai tahanan pentanahan dapat memenuhi standar ketentuan PLN dengan penyederhanaannya sebagai berikut [7], [10]:

Tabel 6. Data nilai tahanan jenis tanah

Jenis Tanah	Resistansi jenis ($\Omega.m$)
Tanah rawa	30
Tanah liat & Tanah ladang	100
Pasir basah	200
Kerikil basah	500
Pasir dan Kerikil kering	1000
Tanah berbatu	3000

$$R = \left(\frac{\rho}{2\pi L} \right) \ln \left(\frac{2L}{d} \right) \quad (13)$$

$$A = \sqrt[4]{2 \frac{1}{2} a^3 r} \quad (14)$$

$$R = \left(\frac{\rho}{2\pi L} \right) \ln \left(\frac{2L}{\sqrt[4]{2 \frac{1}{2} a^3 r}} \right)$$

Di mana,

ρ = dikarena jenis tanah diantara pasir basah dan kerikil basah, jadi

$$\frac{500 + 200}{2} = 375 \Omega.m$$

$$L = 20 \text{ meter}$$

$$\text{Jumlah elektroda} = 4$$

$$\text{Jari-jari elektroda} = 0,045 \text{ m}$$

$$\text{Jarak antara batang pentanahan} = 10 \text{ m}$$

Maka,

$$R = \left(\frac{375}{2 \times 3,14 \times 20} \right) \ln \left(\frac{2 \times 20}{\sqrt[4]{2 \frac{1}{2} \times 10^3 \times 0,045}} \right)$$

$$R = \left(\frac{375}{125,6} \right) \ln \left(\frac{40}{\sqrt[4]{112,5}} \right)$$

$$R = \left(\frac{375}{125,6} \right) \ln \left(\frac{40}{3,257} \right)$$

$$R = \left(\frac{375}{125,6} \right) \ln(12,285)$$

$$R = \left(\frac{375}{125,6} \right) \times 2,5084$$

$$R = (2,98) \times 2,5084$$

$$R = 7,489 \Omega$$

Hasil dari perhitungan tahanan baru adalah sebesar 7,489 Ω yang mana hasil pentanahan tersebut sesuai dengan standar nilai *grounding* dari *IEEE Std 80-2000* atau nilai tahanan pentanahan $\leq 10 \Omega$ [10], [15].

Tabel 7. Perhitungan tahanan pentanahan dengan penambahan Panjang elektroda

Panjang Elektroda (m)	Tahanan (Ω)
10	10,837
15	8,837
20	7,489

3.2.2. Pengukuran Tahanan Pentanahan Baru Secara Real Lapangan

Untuk mendapatkan pengukuran tahanan pentanahan yang baru, penulis menanamkan tiga batang elektroda dengan jarak 10 meter pada masing-masing batang [7]. Pada pengerjaannya dilakukan oleh 4 orang pelaksana pekerjaan, 1 orang pengawas pekerjaan dan 1 orang pengawas K3L.

Pelaksana pekerjaan melakukan pekerjaan dalam rentang waktu lebih kurang 3 jam untuk memasang elektroda yang baru pada Tower 31 penghantar Sentul – Cibinong. Yang diawali dengan menyiapkan peralatan yang akan digunakan kemudian dilakukannya safety briefing untuk menjelaskan apa saja yang akan dilakukan dan proses bagaimana pekerjaan itu dilakukan, dilanjutkan dengan pengerjaan penggalian tanah menggunakan cangkul untuk menancapkan elektroda pentanahan.

Setelah selesai melakukan pekerjaan, penulis akan melakukan pengukuran pentanahan dengan metode tiga titik dengan menggunakan alat uji pentanahan Fluke 1625-2 dengan hasil pengukuran dapat dilihat pada Gambar 5.

Sehingga nilai pengukuran nilai tahanan pentanahan 5,20ohm yang mana hasil nilai resistansi pentanahan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan oleh *IEEE Std 80-2000* atau nilai tahanan pentanahan $\leq 10 \Omega$ [7], [15].



Gambar 5. Nilai pengukuran pentanahan yang baru

3.3. Perbandingan Nilai Tegangan Crossarm Sebelum dan Sesudah perubahan Tahanan Pentanahan

Dengan menggunakan parameter pentanahan yang telah diperbaiki, dan menggunakan asumsi arus gangguan petir yang melewati batas *flashover* pada isolator yaitu sebesar 35 kA.

Maka hasil perhitungan untuk mendapatkan nilai tegangan crossarm yaitu:

3.3.1. Menghitung Faktor Redaman

$$\psi = \left[\frac{2Z_t - Z_g}{(2Z_t + Z_g)^2} \right] \left[\frac{Z_t - R_p}{Z_t + R_p} \right] \quad (6)$$

Di mana,

$$Z_g = 394,73 \, \Omega$$

$$Z_t = 175,595 \, \Omega$$

$$R_p = 7,489 \, \Omega$$

Maka,

$$\psi = \left[\frac{2 \times 175,595 - 394,73}{(2 \times 175,595 + 394,73)^2} \right] \left[\frac{175,595 - 7,489}{175,595 + 7,489} \right]$$

$$\psi = \left[\frac{351,19 - 394,73}{(351,19 + 394,73)^2} \right] \left[\frac{168,106}{183,084} \right]$$

$$\psi = \left[\frac{-43,54}{(745,92)^2} \right] [0,9182]$$

$$\psi = \left[\frac{-43,54}{556.396,6464} \right] [0,9182]$$

$$\psi = [-0,0000782535][0,9182]$$

$$\psi = -0,000072$$

Dari persamaan (6), data untuk menghitung faktor redaman diperoleh dari hasil impedansi menara, impedansi surja kawat tanah dan nilai resistansi pentanahan menara. Sehingga didapat hasil faktor redaman yaitu -0,000072 [12].

3.3.2. Menghitung Tegangan Puncak Menara

Untuk perhitungan Tegangan Puncak Menara menggunakan arus asumsi sebesar 35 kA karena

sebelumnya pada tabel sebelumnya yang mampu menembus tegangan loncatan api pada isolator adalah arus 35 kA dengan tegangan *crossarm* sebesar 1449,3548 kV [11], [12].

$$V_t = \left[Z_I - \frac{Z_W}{1-\psi} \left(1 - \frac{\tau_T}{1-\psi} \right) \right] \cdot I \quad (9)$$

Di mana,

$$Z_I = 92,9223 \, \Omega$$

$$Z_W = 57,27387 \, \Omega$$

$$\tau_T = 0,14 \, \mu s$$

$$\psi = -0,000072$$

$$I = 35 \, kA$$

Maka,

$$V_t = \left[92,9223 - \frac{57,27387}{1+0,000072} \left(1 - \frac{0,14}{1+0,000072} \right) \right] \cdot 35$$

$$V_t = [92,9223 - 57,2697(1 - 0,13999)] \cdot 35$$

$$V_t = [92,9223 - 57,2697(0,86)] \cdot 35$$

$$V_t = [92,9223 - 49,25198] \cdot 35$$

$$V_t = 43,67 \times 35$$

$$V_t = 1528,461 \, kV$$

3.3.3. Menghitung Tegangan Dasar Menara

Untuk mencari tegangan pada dasar menara, langkah pertama adalah menghitung pembiasan pada tahanan kaki menara, dengan persamaan (10) [11] .

$$\alpha_R = \frac{2 \cdot R}{Z_t + R} \quad (10)$$

Di mana,

$$Z_t = 175,595 \, \Omega$$

$$R = 7,489 \, \Omega$$

Maka,

$$\alpha_R = \frac{2 \times 7,489}{175,595 + 7,489}$$

$$\alpha_R = \frac{14,978}{183,084}$$

$$\alpha_R = 0,0818$$

Setelah nilai pembiasan dihitung dengan hasil sebesar 0,0818, langkah selanjutnya adalah menghitung tegangan dasar menara dengan perhitungan persamaan (11) (Anderson, 1982).

$$V_R = \left[\frac{\alpha_R \cdot Z_I}{1-\psi} \right] \left[1 - \frac{\psi \cdot \tau_T}{(1-\psi)} \right] \cdot I \quad (11)$$

Di mana,

$$\alpha_R = 0,0818$$

$$Z_I = 92,9223 \, \Omega$$

$$\tau_T = 0,14 \, \mu s$$

$$\psi = -0,000072$$

$$I = 35 \, kA$$

Maka,

$$V_R = \left[\frac{0,0818 \times 92,9223}{1 + 0,000072} \right] \left[1 - \frac{-0,000072 \times 0,14}{(1 + 0,000072)} \right] \cdot 35$$

$$V_R = \left[\frac{7,6019}{1,000072} \right] \left[1 - \frac{-0,000072 \times 0,14}{(1,000072)} \right] \cdot 35$$

$$V_R = [7,601][1 + 0,0000100793] \cdot 35$$

$$V_R = [7,601][1,0000100793] \cdot 35$$

$$V_R = 7,6010766 \times 35$$

$$V_R = 266,038 \text{ kV}$$

Sehingga Tegangan yang terjadi pada dasar menara diperoleh sebesar 266,038 kV

3.3.4. Menghitung Tegangan Crossarm

$$V_{pn} = V_R + \frac{\tau_T - \tau_{pn}}{\tau_T} [V_T - V_R] \quad (12)$$

Di mana,

$$V_R = 266,038 \text{ kV}$$

$$\tau_{pn} = 0,00989 \mu\text{s}$$

$$\tau_T = 0,14 \mu\text{s}$$

$$V_t = 1528,461 \text{ kV}$$

Maka,

$$V_{pn} = 266,038 + \frac{0,14 - 0,00989}{0,14} [1528,461 - 266,038]$$

$$V_{pn} = 266,038 + \frac{0,13011}{0,14} [1262,423]$$

$$V_{pn} = 266,038 + 0,929[1262,423]$$

$$V_{pn} = 266,038 + 1172,79$$

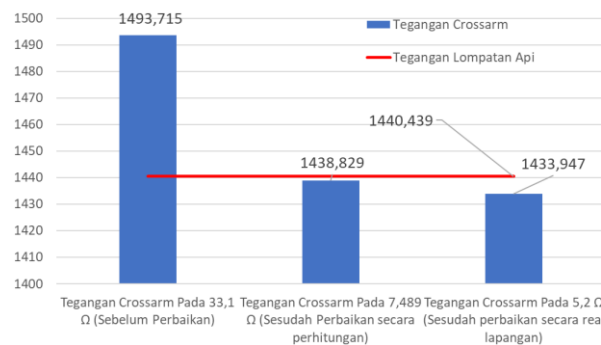
$$V_{pn} = 1438,829 \text{ kV}$$

Apabila nilai pentanahan dimasukkan pada tabel, maka didapatkan nilai perbandingan nilai pentanahan pada perhitungan dan pengukuran pada perhitungan nilai Tegangan Crossarm mengabaikan korona dapat dilihat pada Tabel 8 [11].

Tabel 8. Perhitungan dengan perubahan arus sambaran yang mengakibatkan back flashover

Tegangan Crossarm Pada Perhitungan Tahanan Pentanahan (7,489 Ω) secara perhitungan	Tegangan Crossarm Pada Pengukuran Tahanan Pentanahan (5,20 Ω) secara real lapangan
1438,829 kV	1433,947 kV

Sehingga jika salah satu nilai tahanan pentanahan yang baru diimplementasikan pada perhitungan analisis gangguan petir dengan arus sebesar 35 kA maka akan didapatkan grafik yang dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar tersebut menunjukkan bahwa tegangan crossarm yang telah dilakukan perbaikan tahanan pentanahan berupa pemanjangan batang elektroda akan menghasilkan perubahan tegangan yang cukup signifikan.



Gambar 6. Tegangan Crossarm sebelum dan sesudah perbaikan pentanahan

4. Kesimpulan

Nilai tahanan pentanahan mencapai 33,2 Ω , yang melebihi standar nilai grounding dari IEEE Std 80-2000. Karakteristik arus sambaran yang digunakan dalam analisis berkisar antara 20 kA hingga 80 kA.

Pada kondisi awal, tegangan crossarm yang terjadi mencapai 1493,715 kV ketika arus sambaran adalah 35 kA. Nilai ini melebihi batas tegangan lompatan api, yaitu 1440,439 kV, sehingga mengindikasikan potensi terjadinya back flashover.

Setelah dilakukan perbaikan dengan menambah panjang elektroda pentanahan sepanjang 20 meter, nilai resistansi pentanahan baru yang diperoleh sesuai dengan standar grounding dari IEEE Std 80-2000, yaitu 7,489 Ω , sementara pada pengukuran aktual tercatat sebesar 5,20 Ω .

Dampak dari perbaikan ini terhadap tegangan crossarm cukup signifikan, di mana tegangan turun dari 1493,715 kV menjadi 1438,829 kV dan 1433,947 kV pada arus sambaran 35 kA. Nilai tegangan setelah perbaikan turun hingga mendekati atau berada di bawah batas tegangan lompatan api, sehingga risiko back flashover dapat dikurangi secara signifikan.

Referensi

- [1]. Y. K. Putra, "Analisis Kemampuan Pentanahan Menara SUTT Terhadap Sambaran Petir Langsung Yang Mengakibatkan Backflashover Pada Saluran Transmisi 150 kV Ponogoro – Manisrejo," 2017.
- [2]. M. Syarifuddin, "Teknik Tegangan Tinggi: Petir dan Permasalahannya," *Diktat Kuliah. Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya*, 2007.
- [3]. BMKG, "Informasi Sambaran Petir Bulan Januari 2024." Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.bmkg.go.id/geofisika-potensial/peta-sambaran-petir/informasi-sambaran-petir-bulan-januari-2024>
- [4]. A. R. Hileman, "The Backflash," *Insulation Coordination for Power Systems*, 2018, doi: 10.1201/9781420052015-10.

- [5] PLN UPT Bogor, "Data Gangguan PLN UPT Bogor." Accessed: Aug. 01, 2024. [Online]. Available: https://lookerstudio.google.com/u/0/reporting/7b9b1d7b-6cfd-4e38-bd66-2a149b457054/page/p_9m2spyqt4c.
- [6] PLN UPT Bogor, "Data Pentanahan PLN ULTG Bogor," 2024, Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: http://10.89.1.168:8027/newsrintami/web/rdash_63b98fa6eedf1
- [7] PT. PLN (Persero), *Buku Pedoman Saluran Udara Tegangan Tinggi Dan Ekstra Tinggi (Sutt/Sutet)*. Jakarta Selatan, 2014.
- [8] R. M. Arias Velásquez and J. V. Mejía Lara, "The Problem of the Actual Insulation Coordination for 500 kV with Overvoltage in Substations and the Needed for More Surge Arresters in High Voltage Grid," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 9, p. 102130, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102130.
- [9] A. P. Singh, S. Ghosh, A. S. Rones V, and S. Sahay, "Analysis and Mitigation of Secondary Arcing & Resonance Overvoltage Problem in Shunt Compensated Lines -Case Study," in *2022 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET)*, IEEE, May 2022, pp. 140–145. doi: 10.1109/GlobConET53749.2022.9872373.
- [10] T. S. Hutaaruk and T. Soantahon, *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Erlangga, 1991.
- [11] J. G. Anderson, "Transmission Line Reference Book 345 kV and Above.(1982)," *Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA*, 1982.
- [12] T. S. Hutaaruk and M. E. E. Ir, *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Jakarta, 1988.
- [13] B. L. Tobing, P. T. Tinggi, and G. P. U. Jakarta, "TS Hutaaruk, Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja," *Erlangga. Jakarta*, 1988.
- [14] A. Syakur and Y. Yuningtyastuti, "Sistem Proteksi Penangkal Petir pada Gedung Widya Puraya," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik ...*, 2006, [Online]. Available: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/transmisi/article/view/1580>
- [15] L. M. Coa, "Comparative Study between IEEE Std. 80-2000 and Finite Elements Method application for Grounding Systems Analysis," in *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006, pp. 1–5. doi: 10.1109/TDCLA.2006.311654.