

Analisis Sistem Pembumian Tower dengan Menggunakan Mesh Grid Grounding pada T.213 SUTT 70 kV Pekalongan - Sukamerindu

Erawati Purnama Panjaitan¹⁾; Parlin Siagian²⁾; Siti Anisah³⁾

^{1,2,3)} Program study Teknik Elektro Universitas Pembangunan Panca Budi Medan

Email: ¹⁾ erawatipanjaitan@gmail.com; ²⁾ parlinsiagian@dosen.pancabudi.ac.id

³⁾ sitianisah@dosen.pancabudi.ac.id

ARTICLE HISTORY

Received [10 Juni 2026]

Revised [20 Juli 2026]

Accepted [24 Juli 2026]

KEYWORDS

Grounding System, Mesh Grid Grounding, 70 kV Transmission Tower, Grounding Resistance, IEEE Std 80.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



ABSTRAK

Sistem pembumian merupakan bagian penting dalam menjaga keselamatan dan keandalan sistem transmisi tenaga listrik, khususnya pada tower transmisi tegangan tinggi. Pada tower transmisi, sistem pembumian berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan akibat sambaran petir maupun gangguan hubung singkat ke tanah secara aman. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem pembumian tower transmisi 70 kV dengan menggunakan metode Mesh Grid Grounding System (MGGS) pada Tower T.213 jalur Pekalongan – Sukamerindu. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan pendekatan analisis teknis, yaitu melakukan perhitungan tahanan pembumian sistem grid, sistem ground rod, serta tahanan pembumian total MGGS berdasarkan data lapangan. Data yang digunakan meliputi tahanan jenis tanah sebesar 48,7 Ωm , panjang konduktor grid 66 m, luas area grid 36 m², kedalaman penanaman konduktor 1 m, serta penggunaan 20 batang ground rod dengan panjang 2 m. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan untuk mengetahui tingkat keandalan sistem pembumian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tahanan pembumian awal sebesar 8,46 Ω dapat diturunkan menjadi 4,46 Ω setelah penerapan metode MGGS. Penurunan nilai tahanan pembumian tersebut mencapai 47,3%, yang menunjukkan bahwa metode MGGS efektif dalam meningkatkan kinerja sistem pembumian tower. Berdasarkan evaluasi terhadap standar IEEE Std 80, nilai tahanan pembumian akhir yang diperoleh masih berada di bawah batas maksimum yang direkomendasikan, sehingga sistem pembumian Tower T.213 dinyatakan aman dan layak digunakan. Dengan demikian, penerapan metode Mesh Grid Grounding System (MGGS) terbukti mampu meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem pembumian pada tower transmisi 70 kV

ABSTRACT

The grounding system is an important part of maintaining the safety and reliability of electrical power transmission systems, especially in high-voltage transmission towers. In transmission towers, the grounding system functions to safely conduct fault currents caused by lightning strikes or short circuits to the ground. This study aims to analyze the grounding system of a 70 kV transmission tower using the Mesh Grid Grounding System (MGGS) method on Tower T.213 of the Pekalongan - Sukamerindu line. The research method used is a quantitative method with a technical analysis approach, namely calculating the grounding resistance of the grid system, the ground rod system, and the total MGGS grounding resistance based on field data. The data used included soil resistivity of 48.7 Ωm , grid conductor length of 66 m, grid area of 36 m², conductor planting depth of 1 m, and the use of 20 ground rods with a length of 2 m. The calculation results were then compared with the field measurement results to determine the reliability level of the grounding system. The results of the study show that the initial grounding resistance value of 8.46 Ω can be reduced to 4.46 Ω after applying the MGGS method. The reduction in grounding resistance value reached 47.3%, indicating that the MGGS method is effective in improving the performance of the tower grounding system. Based on an evaluation of the IEEE Std 80 standard, the final grounding resistance value obtained was still below the recommended maximum limit, so the grounding system of Tower T.213 was declared safe and suitable for use. Thus, the application of the Mesh Grid Grounding System (MGGS) method has been proven to improve the reliability and safety of the grounding system on 70 kV transmission towers.

PENDAHULUAN

Sistem transmisi tenaga listrik memegang peranan penting dalam menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit menuju gardu induk dan konsumen. Keandalan dan keselamatan sistem transmisi sangat dipengaruhi oleh kondisi peralatan pendukung, salah satunya adalah sistem pembumian (grounding) pada tower transmisi. Sistem pembumian yang baik berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan ke tanah secara aman, mengurangi tegangan sentuh dan tegangan langkah, serta melindungi manusia dan peralatan dari bahaya listrik. (J. A. P. Sihombing, dkk 2024)

Tower transmisi 70 kV T.213 Pekalongan – Sukamerindu merupakan bagian dari jaringan transmisi yang beroperasi secara kontinu dan berada di area terbuka yang berpotensi mengalami gangguan, seperti sambaran petir dan hubung singkat ke tanah. Apabila sistem pembumian pada tower tidak dirancang dengan baik, maka dapat menimbulkan nilai tahanan pentanahan yang tinggi, sehingga

berisiko menyebabkan tegangan sentuh dan tegangan langkah melebihi batas aman. Kondisi ini dapat membahayakan keselamatan personel pemeliharaan maupun masyarakat di sekitar tower.

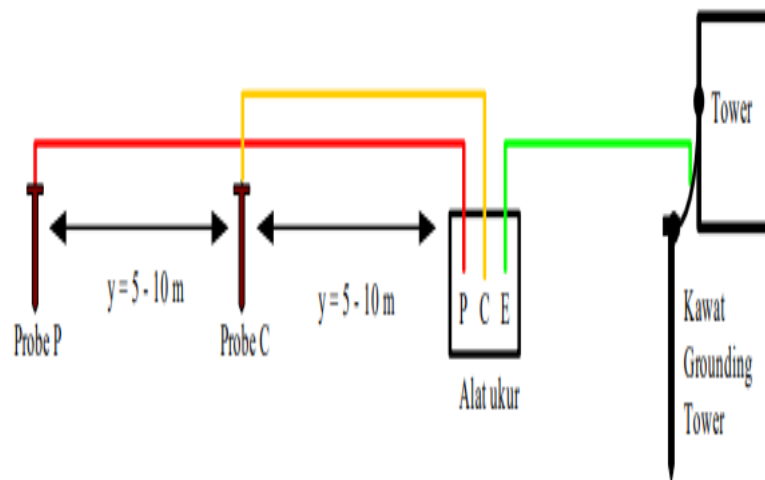
Salah satu metode yang umum digunakan untuk meningkatkan kinerja sistem pembumian adalah Mesh Grid Grounding System (MGGS). Metode ini menggunakan konduktor yang ditanam secara horizontal membentuk grid pada area sekitar kaki tower, dan dapat dikombinasikan dengan ground rod yang ditanam secara vertikal. MGGS memiliki keunggulan dalam menurunkan nilai tahanan pentanahan serta meratakan distribusi potensial tanah, sehingga dapat mengurangi risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah.

Berdasarkan standar IEEE Std 80, sistem pembumian pada instalasi tenaga listrik harus memenuhi batas nilai tahanan pentanahan tertentu agar sistem dinyatakan aman. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis terhadap sistem pembumian pada tower transmisi 70 kV T.213 Pekalongan – Sukamerindu untuk mengetahui apakah sistem yang diterapkan telah memenuhi standar keselamatan yang berlaku.(IEEE Std 80-2013)

LANDASAN TEORI

Pembumian pada tower

Pembumian pada tower transmisi pada Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET) bertujuan untuk menjamin keamanan personal dari tegangan sentuh dan tegangan Langkah pada tower, dan mengalirkan impuls petir ke bumi. Metode pembumian pada tower dilakukan dengan metode *driver rod*, *counterpoise*, *mesh grid grounding sistem (MGGS)*, metode lainnya atau kombinasi sehingga nilai tahanan pembumian pada tower tercapai maksimal 10 Ω . Pada tower yang sering terjadi gangguan back-flashover bisa menggunakan nilai tahanan yang lebih rendah. Khusus untuk 5 (lima) tower dari Gardu Induk nilai tahanan pembumian pada tower sesuai dengan Tabel dibawah. Pengukuran tahanan pembumian tower diukur tanpa dihubungkan dengan kaki tower



Gambar 1 Pengujian Resistansi Pentanahan Tower

Tabel 1 Nilai Tahanan Pembumian Pada 5 Tower Dari Gardu Induk

Level Tegangan Sistem	Nilai Tahanan Pembumian (Ω)
66 KV	≤ 3
150 KV	≤ 3
275 KV	≤ 3
500 KV	≤ 1

Sumber: SPLN T.5.012:2020

Perancangan sistem pembumian pada sistem tenaga listrik mengacu pada beberapa standar, antara lain:

- IEEE Std 80: Guide for Safety in AC Substation Grounding
- PUIL (Persyaratan Umum Instalasi Listrik)
- IEC 61936

Standar-standar tersebut memberikan pedoman mengenai batas aman tahanan pembumian, tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Dengan penerapan sistem pembumian yang sesuai standar, maka keselamatan dan keandalan sistem transmisi tenaga listrik dapat terjamin.

Sifat-sifat Elektroda Pentanahan

Besarnya tahanan kontak sangat ditentukan jenis tanah, struktur tanah dan instalasi pemasangan elektroda. Adapun Rumus persamaan Sistem Pembumian (*Grounding*) yaitu:

Tahanan Pembumian Elektroda Batang (*Ground Rod Tunggal*)

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- R_{rod} = tahanan pembumian batang (Ω)
- ρ = tahanan jenis tanah ($\Omega \cdot m$)
- L = panjang elektroda batang (m)
- d = diameter elektroda batang (m)

Tahanan Pembumian Beberapa *Ground Rod* (Jika digunakan beberapa batang yang dipasang parallel)

$$R_{Total} = \frac{R_{rod}}{n \times \eta} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

- n = jumlah ground rod
- η = faktor efisiensi (dipengaruhi jarak antar rod)

Tahanan Pembumian Sistem Grid (*Mesh Grid Grounding System*) (IEEE Std 80)

$$R_g = \frac{\rho}{4L} \left(1 + \frac{L}{\sqrt{A}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

- R_g = tahanan pembumian grid (Ω)
- ρ = tahanan jenis tanah ($\Omega \cdot m$)
- L = total panjang konduktor grid (m)
- A = luas area grid (m^2)

Arus Gangguan ke Tanah

$$I_g = C_p \times I_f \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

- I_g = arus gangguan ke tanah (A)
- I_f = arus hubung singkat sistem (A)
- C_p = faktor pembagian arus ke tanah

Tegangan Sentuh Aktual (*Touch Voltage*)

$$E_m = \rho K_m K_i \frac{I_g}{L} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

- E_s = tegangan langkah aktual (V)
- K_s = faktor langkah

Tegangan Sentuh Maksimum yang Diizinkan (IEEE Std 80)

$$E_{Touch} = C_s \rho_s \left(\frac{1000 + 6C_s \rho_s}{C_s \rho_s} \right) \dots\dots\dots (6)$$

Dimana:

- E_{touch} = Tegangan Sentuh maksimum yang diizinkan (Volt)
- C_s = Faktor koreksi permukaan tanah
- ρ_s = Tahanan jenis lapisan permukaan tanah ($\Omega \cdot m$)
- 1000 = Nilai resistansi tubuh manusia (Ω) sesuai standar IEEE Std 80
- 6 = Faktor jarak langkah manusia dalam kondisi gangguan

Tahanan Jenis Tanah

Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung beberapa factor dapat dilihat pada tabel dibawah ini. (*Badan Standardisasi Nasional, PUIL 2011*)

Tabel 2 Tahanan Jenis Tanah

No	Jenis Tanah	Tahanan Jenis (ohm.m)
1	Tanah rawa	10 s.d. 40
2	Tanah liat dan lading	20 s.d. 100
3	Pasir basah	50 s.d. 200
4	Kerikil basah	200 s.d. 3.000
5	Pasir dan kerikil kering	< 10.000
6	Tanah berbatu	2.000 s.d. 3.000
7	Air laut dan tawar	10 s.d. 100

Nilai tahanan jenis tanah dihitung menggunakan persamaan:

$$\rho = 2\pi\alpha R \dots\dots\dots (7)$$

Dimana:

- ρ = Tahanan jenis tanah ($\Omega \cdot m$)
- α = Jarak antar elektroda (m)
- R = Tahanan hasil pengukuran (Ω)

Bila menggunakan *driven ground* (batang pengetanahan), tahanan kaki menara dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$R = \left(\frac{\rho}{2\pi L} \right) \ln \left(\frac{2L}{d} \right) \dots\dots\dots (8)$$

Dimana:

- R = tahanan kaki Menara (ohm)
- ρ = tahanan jenis tanah (ohm-meter)
- L = Panjang dari batang pengetanahan (meter)
- d = diameter batang pengetanahan (meter)

Dalam hal ini digunakannya batang pentanahan paralel, rumus diatas tetap dapat digunakan untuk menghitung tahanan kaki menara, bila variable "d" diubah menjadi "A". Harga A adalah kelipatan dari batang pengetanahan yang tergantung dari penempatan masing-masing batang pengetanahan sebagai berikut:

Penempatan 2 batang Dimana Saja

$$A = \sqrt{ar} \dots\dots\dots (9)$$

3 batang diletakkan membentuk segitiga

$$A = \sqrt[3]{a^2 r} \dots\dots\dots (10)$$

4 batang diletakkan membentuk segi empat

$$A = \sqrt[4]{2^{1/2} 2^3 r} \dots\dots\dots (11)$$

Dimana:

- r = jari-jari dari masing-masing batang pengetanahan
- a = jarak antara batang pengetanahan

Untuk daerah-daerah yang mempunyai lapisan tanah yang berkontur keras dan berbatu-batu atau daerah yang tahanan jenis tanahnya tinggi, batang pengetanahan tidak praktis digunakan. Bilamana digunakan sistem *counterpoise*, tahanan kaki menara secara teoritis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$R = \sqrt{r \cdot \rho} \cdot \text{Coth} \left(L \sqrt{\frac{r}{\rho}} \right) \dots\dots\dots (12)$$

Dimana:

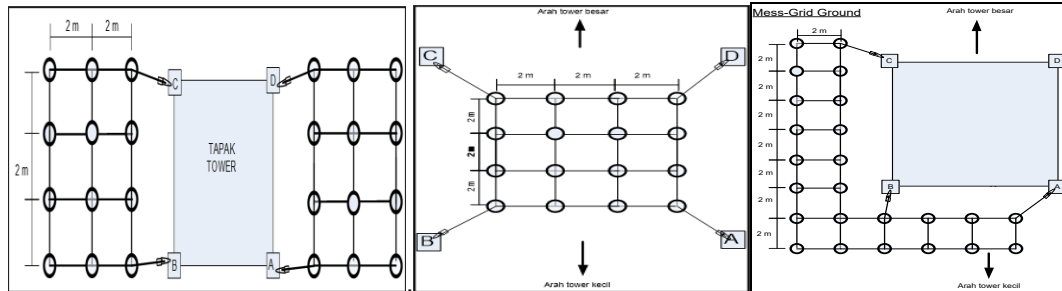
- R = tahanan kaki Menara (ohm)
- ρ = tahanan jenis tanah (ohm-meter)
- L = Panjang kawat (meter)
- r = tahanan kawat tanah (ohm/meter)

Sedangkan Panjang minimum kawat sebagai dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$L = \sqrt{\frac{\rho}{r}} \text{Coth}^{-1} \left[\frac{R}{r\rho} \right] \dots\dots\dots (13)$$

Mesh Grid Grounding (MGGS)

MGGS adalah metode yang memperkecil dan menambah titik buang pentanahan melalui pemasangan multi rod yang saling terhubung (mesh). Pemeliharaan yang dilakukan adalah dengan melakukan pengukuran tahanan pentanahan serta pemeriksaan terminasi/ klem kawat tanah ke tower



Gambar 2 Metode MGGS Desain

Untuk mendapatkan resistansi total, maka perlu menggabungkan perhitungan dari pentanahan pada sistem grid, rod dan juga nilai pentanahan pada kedua sistem.

$$R_s = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - R_m^2} \dots\dots\dots (14)$$

Dimana:

- R_1 = ground resistance of grid conductors in Ω
- R_2 = ground resistance of all ground in Ω
- R_m = mutual ground resistance between the group of grid conductors, R_1 and group of ground rods, R_2 in Ω

Nilai Pentanahan Grid

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \dots\dots\dots (15)$$

Dimana:

- ρ = Tahanan jenis tanah dalam Ω
- L_c = total panjang konduktor mesh grid dalam meter
- a' = kedalaman konduktor yang tertanam dalam tanah
- $2a$ = diameter konduktor dalam meter
- A = luas area yang terbentuk dari mesh grid (m^2)

Nilai Pentanahan Grid

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_c}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{nr} - 1)^2 \right] \dots\dots\dots (16)$$

Dimana:

- L_r = Panjang setiap rod dalam meter
- $2b$ = diameter rod dalam meter
- n_r = jumlah rod dalam satu area A

Total nilai pentanahan rod dan mesh grid

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \dots\dots\dots (17)$$

Metode Mesh Grid Grounding System (MGGS) sesuai dengan prinsip IEEE Std 80 karena mampu menurunkan tahanan pembumian dan meratakan potensial tanah di sekitar tower. Menentukan Perhitungan Tahanan Sistem Grid (Mesh):

$$R_g = \frac{\rho}{4L} + \frac{\rho}{8\sqrt{A}} \quad (18)$$

Dimana:

R_g = tahanan grid (Ω)

ρ = tahanan jenis tanah (Ωm)

L = panjang total konduktor grid (m)

A = luas Area grid (m^2)

Tahanan satu batang ground rod dapat dihitung menggunakan persamaan

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi l_r} \left[\ln \left(\frac{4l_r}{d_r} \right) - 1 \right] \quad (19)$$

Dimana:

R_{rod} = tahanan rod tunggal (Ω)

ρ = tahanan jenis tanah (Ωm)

l_r = panjang rod (m)

d_r = diameter rod (m)

Untuk pendekatan sederhana, tahanan rod total dapat dihitung.

$$R_r = \frac{R_{Rod}}{n} \quad (20)$$

Dimana:

R_r = tahanan sistem rod (Ω)

R_{rod} = tahanan satu rod (Ω)

n = jumlah rod

Tahanan gabungan grid dan rod dapat dihitung menggunakan konsep paralel sebagai berikut

$$R_{eq} = \frac{R_g \times R_r}{R_g + R_r} \quad (21)$$

Dimana:

R_{eq} = tahanan gabungan Grid dan Rod (Ω)

R_g = tahanan grid (Ω)

R_r = tahanan rod (Ω)

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran tahanan pembumian sebelum dan sesudah penerapan MGGS, Selisih penurunan tahanan pembumian dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta R = R_{Awal} - R_{Akhir} \quad (22)$$

Dimana:

ΔR = selisih penurunan tahanan pembumian (Ω)

R_{awal} = tahanan pembumian sebelum MGGS (Ω)

R_{akhir} = tahanan pembumian sesudah MGGS (Ω)

Sedangkan persentase penurunan tahanan pembumian dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\%Penurunan = \frac{R_{Awal} - R_{Akhir}}{R_{Awal}} \times 100\% \quad (23)$$

Perbandingan dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil perhitungan teoritis dengan kondisi lapangan Error (Selisih) Hasil Hitung dan Ukur

$$Error = |R_{Hitung} - R_{Ukur}| \quad (24)$$

Dimana:

R_{Hitung} = tahanan pembumian hasil perhitungan (Ω)

R_{ukur} = tahanan pembumian hasil pengukuran (Ω)

Persentasi Error

$$\%Error = \frac{|R_{Hitung} - R_{Ukur}|}{R_{Ukur}} \times 100\% \dots\dots\dots (25)$$

METODE PENELITIAN

Metode Analisis

Penelitian ini dilaksanakan pada tower transmisi T.213 Pekalongan – Sukamerindu yang merupakan bagian dari sistem transmisi tegangan tinggi 70 kV. Penelitian dilakukan dengan cara menghitung dan menganalisis nilai tahanan pembumian sistem tower transmisi 70 kV menggunakan metode *Mesh Grid Grounding System* (MGGS) serta mengevaluasi kelayakan hasil berdasarkan standar keselamatan pembumian, seperti IEEE Std 80.

Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilakukan pada Tower Transmisi T.213 jalur Pekalongan – Sukamerindu pada sistem transmisi tegangan 70 kV. Lokasi ini dipilih karena merupakan salah satu tower yang berperan penting dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik pada jaringan transmisi tersebut.

Data Penelitian

Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3 Parameter Data Sistem Pembumian

No	Parameter	Simbol	Nilai
1	Tahanan jenis tanah	ρ	48,7 Ω m
2	Panjang konduktor grid	L	66 m
3	Kedalaman penanaman	h	1 m
4	Luas area grid	A	36 m ²
5	Diameter ground rod	dr	0,0159 m
6	Jumlah rod	n	20 Btg
7	Panjang rod	lr	2 m
8	Diameter konduktor	d	0,007 m
9	kawat GSW 55mm	L _{GWS}	66m
10	Pentanahan awal (sebelum perbaikan MGGS)	R _{Awal}	8,46 Ω
11	Pentanahan Akhir (setelah pemasangan MGGS)	R _{Akhir}	4,46 Ω

Sumber: Data penulis, 2026

Metode Perhitungan *Mesh Grid Grounding System* (MGGS)

Metode Mesh Grid Grounding System (MGGS) merupakan metode pembumian yang menggunakan konduktor horizontal yang ditanam membentuk jaringan (grid/mesh) dan biasanya dikombinasikan dengan elektroda vertikal (ground rod). Tujuan utama metode MGGS adalah untuk menurunkan tahanan pembumian, meratakan distribusi potensial tanah, serta mengurangi tegangan sentuh dan tegangan langkah. Parameter yang digunakan dalam perhitungan MGGS meliputi:

- ρ = tahanan jenis tanah (Ω m)
- L = panjang total konduktor grid (m)
- h = kedalaman penanaman grid (m)
- A = luas area grid (m²)
- d = diameter konduktor grid (m)
- lr = panjang ground rod (m)
- dr = diameter ground rod (m)
- n = jumlah ground rod (batang)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Untuk menghitung tahanan pembumian grid, salah satu pendekatan yang sering digunakan dengan persamaan (3) adalah

$$R_g = \frac{\rho}{4L} + \frac{\rho}{8\sqrt{A}}$$

Maka

$$\frac{\rho}{4L} = \frac{48,7\Omega m}{4(66m)}$$

$$\frac{\rho}{4L} = \frac{48,7}{264}$$

$$\frac{\rho}{4L} = 0,1845\Omega$$

Akar luas grid:

$$\sqrt{A} = \sqrt{36} = 6$$

$$\frac{\rho}{\sqrt{8A}} = \frac{48,7}{8(6)} = \frac{48,7}{8} = 1,0146\Omega$$

Maka

$$R_g = 0,1845 + 1,0146 = 1,1991\Omega$$

$$R_g \approx 1,20\Omega$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem grid yang dirancang mampu menurunkan tahanan pembumian dengan memanfaatkan panjang konduktor sebesar 66 m serta luas area grid 36 m².

Perhitungan Tahanan Sistem Rod (Rr)

Tahanan sistem rod merupakan tahanan yang dihasilkan oleh elektroda vertikal (ground rod) yang ditanam ke dalam tanah. Ground rod berfungsi memperdalam jalur pelepasan arus gangguan sehingga mampu mencapai lapisan tanah yang lebih lembab dan lebih konduktif dapat dihitung dengan persamaan (19) sebagai berikut:

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi d_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{d_r} \right) - 1 \right]$$

$$\frac{4L_r}{d_r} = \frac{4(2)}{0,0159}$$

$$\frac{4L_r}{d_r} \frac{8}{0,0159} = 503,145$$

$$\ln(503,145) = 6,220$$

$$\ln \left(\frac{4L_r}{d_r} \right) - 1 = 6,220 - 1 = 5,220$$

$$\frac{\rho}{2\pi L_r} = \frac{48,7}{2\pi(2)}$$

$$\frac{\rho}{2\pi L_r} = \frac{48,7}{12,566} = 3,874$$

$$R_{rod} = 3,874 \times 5,220$$

$$R_{Rod} = 20,22$$

Jadi Untuk satu batang Rod $\approx 20,22\Omega$

Tahanan sistem Rod (20 Batang)

Jika rod dipasang paralel dan jaraknya cukup jauh (efek mutual kecil), maka pendekatan sederhananya menggunakan persamaan (20) yaitu:

$$R_r = \frac{R_{Rod}}{n}$$

$$R_r = \frac{20,22}{20}$$

$$R_{Rod} = 1,01\Omega$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa pemasangan 20 batang ground rod dengan panjang 2 m memberikan kontribusi penurunan tahanan pembumian secara signifikan

Perhitungan Tahanan Gabungan Grid dan Rod (R_{1-2})

Pada sistem MGGS, terdapat pengaruh gabungan antara grid dan rod yang tidak selalu sama dengan perhitungan paralel sederhana karena adanya interaksi resistansi (mutual resistance). Oleh karena itu, dilakukan perhitungan tahanan antara R_1 dan R_2 sebagai bagian dari evaluasi sistem gabungan.

Karena sistem grid dan rod terhubung pada titik yang sama dan sama-sama melepas arus ke tanah, maka keduanya bekerja seperti rangkaian paralel dapat dihitung dengan persamaan (21) yaitu sebagai berikut:

$$R_{1-2} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{1-2} = \frac{(1,20)(1,01)}{1,20 + 1,01}$$

$$R_{1-2} = 1,20 \times 1,01 = 1,212$$

$$R_{1-2} = 1,20 + 1,01 = 2,21$$

$$R_{1-2} = \frac{1,212}{2,21} = 0,5484\Omega$$

$$R_{1-2} \approx 0,54\Omega$$

Nilai 0,54 Ω ini adalah nilai gabungan teoritis ideal (paralel sempurna). Di lapangan, nilai bisa lebih besar karena: Efek mutual resistance antar rod dan grid, Jarak rod berdekatan, Tahanan sambungan/klem, Kondisi tanah tidak homogen, Kelembaban tanah berubah.

Perhitungan Tahanan Pembumian Total (R_{total})

Pada sistem Mesh Grid Grounding System (MGGS), tahanan total umumnya dihitung dengan memasukkan pengaruh interaksi antara grid dan rod (mutual resistance), sehingga bentuk persamaannya dihitung menggunakan persamaan (2) sebagai berikut:

$$R_{Total} = R_{1-2}$$

$$R_{Total} = \frac{R_g \times R_r}{R_g + R_r}$$

Maka:

$$R_{Total} = \frac{(1,20)(1,01)}{1,20 + 1,01}$$

$$R_{Total} = \frac{1,212}{2,21}$$

$$R_{Total} = 0,5484\Omega$$

Tabel 4 Hasil Perhitungan MGGS

Komponen	Simbol	Nilai (Ω)
Tahanan Grid	R_g	1,27
Tahanan Rod	R_r	1,01
Gabungan Grid–Rod	R_{1-2}	0,56
Tahanan Total MGGS	R_{total}	0,56
Ukur Awal	R_{awal}	8,46
Ukur Akhir	R_{akhir}	4,46

Analisis Error (%) Hasil Perhitungan vs Hasil Pengukuran

Hasil perhitungan tahanan pembumian total (MGGS)

$$R_{Hitung} = R_{Total} = 0,54\Omega$$

Hasil pengukuran tahanan pembumian akhir (lapangan)

$$R_{Ukur} = R_{Akhir} = 4,46\Omega$$

Maka dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (24) sebagai berikut ini:

$$Error = |R_{Ukur} - R_{Hitung}|$$

Maka:

$$Error = |4,46 - 0,54|$$

$$Error = 3,92\%$$

Error persen biasanya dihitung terhadap nilai pengukuran (karena pengukuran adalah kondisi nyata lapangan)

$$\%Error = \frac{|R_{Ukur} - R_{Hitung}|}{R_{Ukur}} \times 100\%$$

$$\%Error = \frac{3,92}{4,46} \times 100\%$$

$$\%Error = 87,89\%$$

$$Maka Persentase Error \approx 87,89\%$$

Tabel 5 Hasil Perbandingan Hasil Hitung dan Hasil Ukur

Komponen	Nilai (Ω)
Hasil Perhitungan MGGS	0,54
Hasil Pengukuran Akhir	4,46
Error Absolut	$R_{Ukur} - R_{Hitung}$
Error %	87,89%

Nilai error yang cukup besar terjadi karena perhitungan teoritis menggunakan asumsi ideal, sedangkan kondisi lapangan dipengaruhi banyak faktor, seperti:

- Tanah tidak homogen nilai tahanan jenis tanah p bisa berubah di kedalaman berbeda (lapisan tanah kering/basah).
- Efek mutual resistance antar rod karena jumlah rod banyak (20 batang) dan jaraknya relatif dekat, tahanan total tidak benar-benar menjadi R_{rod}/n .
- Kualitas sambungan konduktor dan klem sambungan yang kurang rapat atau korosi akan meningkatkan resistansi.
- Kondisi kelembaban tanah saat pengukuran tanah lebih kering, (tahanan lebih tinggi). Tanah lebih basah (tahanan lebih rendah).
- Kontak rod terhadap tanah tidak sempurna jika rod tidak tertanam rapat atau ada rongga, nilai ukur bisa naik

Analisis Penurunan Tahanan Pembumian (Awal → Akhir)

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan pada tower T.213 diperoleh:
Tahanan pembumian awal (sebelum MGGS):

$R_{awal} = 8,46 \Omega$
Tahanan pembumian akhir (sesudah MGGS):
 $R_{akhir} = 4,46 \Omega$

Maka penurunan tahanan (ΔR) dapat dihitung dengan persamaan (22) sebagai berikut:

$$\Delta R = R_{awal} - R_{akhir}$$

$$\Delta R = 8,46 - 4,46$$

$$\Delta R = 4,00 \Omega$$

Namun

penurunan persentase dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut ini:

$$\% \text{Penurunan} = \frac{R_{awal} - R_{akhir}}{R_{awal}} \times 100\%$$

maka dapat dihitung sebagai berikut:

$$\% \text{Penurunan} = \frac{8,46 - 4,46}{8,46} \times 100\%$$

$$\% \text{Penurunan} = \frac{4,00}{8,46} \times 100\%$$

$$\% \text{Penurunan} = 47,28\%$$

Persentase Efektivitas MGGS

Efektivitas MGGS dapat dinyatakan sebagai keberhasilan sistem dalam menurunkan tahanan pembumian dari kondisi awal ke kondisi akhir:

Efektifitas MGGS = %Penurunan sehingga Efektifitas MGGS $\approx 47,28\%$

Tabel 6 Ringkasan Penurunan Tahanan

Komponen	Simbol	Nilai (Ω)
Sebelum MGGS	R_{awal}	8,46
Sesudah MGGS	R_{akhir}	4,46
Penurunan	ΔR	4,00
Persentase Penurunan/Efektifitas	%Penurunan	47,28%

Berdasarkan hasil pengukuran, nilai tahanan pembumian pada tower T.213 sebelum penerapan MGGS sebesar 8,46 Ω , sedangkan setelah penerapan MGGS nilai tahanan pembumian menurun menjadi 4,46 Ω . Penurunan tahanan pembumian yang terjadi sebesar 4,00 Ω atau sekitar 47,28%. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan metode Mesh Grid Grounding System (MGGS) efektif dalam menurunkan nilai tahanan pembumian karena memperluas jalur aliran arus gangguan melalui kombinasi konduktor horizontal (grid) dan elektroda vertikal (ground rod). Dengan nilai tahanan yang lebih rendah, arus gangguan dapat lebih cepat disalurkan ke tanah sehingga meningkatkan keselamatan dan mengurangi potensi bahaya tegangan sentuh dan tegangan langkah di sekitar tower. Dengan demikian, penerapan Mesh Grid Grounding System (MGGS) pada Tower T.213 Pekalongan – Sukamerindu terbukti mampu meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem transmisi tenaga listrik.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan Mesh Grid Grounding System (MGGS) pada Tower T.213 Pekalongan–Sukamerindu mampu menurunkan nilai tahanan pembumian secara nyata. Sistem MGGS menggabungkan konduktor horizontal berbentuk grid dan elektroda vertikal berupa ground rod. Kombinasi tersebut bertujuan memperluas bidang kontak sistem pembumian dengan tanah sekaligus menyediakan jalur pelepasan arus gangguan ke lapisan tanah yang lebih dalam. Dengan semakin luasnya area kontak antara elektroda dan tanah, arus gangguan dapat didistribusikan melalui lebih banyak jalur sehingga tahanan pembumian dapat dikurangi.

Berdasarkan hasil perhitungan, tahanan pembumian grid diperoleh sebesar 1,27 Ω . Nilai tersebut dihasilkan dari rancangan grid dengan panjang konduktor total sebesar 66 meter dan luas area sebesar 36 m². Penggunaan konduktor yang lebih panjang serta area grid yang lebih luas meningkatkan kontak antara konduktor pembumian dan tanah. Kondisi ini memungkinkan arus gangguan tersebar secara lebih merata pada permukaan tanah, sehingga tahanan yang dihasilkan menjadi lebih rendah dibandingkan sistem pembumian yang hanya menggunakan satu titik elektroda.

Selain sistem grid, penelitian ini menggunakan 20 batang ground rod dengan panjang masing-masing 2 meter. Berdasarkan perhitungan, satu batang ground rod memiliki tahanan sebesar 20,22 Ω . Ketika 20 batang rod dipasang secara paralel dengan asumsi jarak antarrod cukup jauh dan pengaruh resistansi mutual relatif kecil, tahanan sistem rod secara teoritis menjadi sekitar 1,01 Ω . Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan jumlah elektroda vertikal dapat menurunkan tahanan pembumian karena arus gangguan memiliki lebih banyak jalur untuk mengalir ke dalam tanah.

Ground rod juga memberikan keuntungan karena mampu mencapai lapisan tanah yang lebih dalam. Lapisan tanah pada kedalaman tertentu umumnya memiliki kondisi kelembapan dan karakteristik kelistrikan yang berbeda dibandingkan tanah di permukaan. Oleh sebab itu, penggunaan elektroda vertikal dapat membantu meningkatkan efektivitas sistem pembumian, terutama ketika lapisan tanah permukaan memiliki kondisi relatif kering atau nilai tahanan jenis yang tinggi. Meskipun demikian, efektivitas ground rod tetap bergantung pada kedalaman penanaman, jarak antarrod, kondisi tanah, serta kualitas kontak antara permukaan rod dan tanah di sekitarnya.

Hasil perhitungan gabungan antara sistem grid dan rod menunjukkan nilai tahanan teoritis sebesar 0,54–0,56 Ω . Nilai tersebut diperoleh dengan menganggap sistem grid dan sistem rod bekerja sebagai rangkaian paralel sempurna. Secara teoritis, kombinasi dua sistem pembumian dengan nilai tahanan yang berbeda akan menghasilkan tahanan total yang lebih kecil daripada tahanan masing-masing komponennya. Hal ini memperlihatkan bahwa penggabungan grid dan rod merupakan pendekatan yang lebih efektif dibandingkan penggunaan grid atau rod secara terpisah.

Namun demikian, hasil pengukuran lapangan setelah penerapan MGGS menunjukkan nilai tahanan sebesar 4,46 Ω , lebih tinggi daripada hasil perhitungan teoritis. Perbandingan antara hasil perhitungan sebesar 0,54 Ω dan hasil pengukuran sebesar 4,46 Ω menghasilkan error absolut sebesar 3,92 Ω dan error relatif sebesar 87,89%. Besarnya perbedaan tersebut menunjukkan bahwa asumsi-asumsi ideal dalam perhitungan belum sepenuhnya menggambarkan kondisi aktual sistem pembumian di lapangan.

Salah satu penyebab utama perbedaan tersebut adalah kondisi tanah yang tidak homogen. Dalam perhitungan teoritis, nilai tahanan jenis tanah umumnya dianggap seragam pada seluruh area dan kedalaman elektroda. Pada kondisi sebenarnya, tanah dapat tersusun atas beberapa lapisan dengan tingkat kepadatan, kelembapan, kandungan mineral, dan tahanan jenis yang berbeda. Lapisan tanah yang lebih kering atau berbatu dapat meningkatkan tahanan pembumian, sedangkan lapisan yang lebih lembap dan memiliki kandungan elektrolit lebih tinggi dapat menurunkan tahanan.

Perbedaan hasil perhitungan dan pengukuran juga dapat dipengaruhi oleh resistansi mutual antar-ground rod. Perhitungan tahanan rod sebesar tahanan satu batang dibagi jumlah rod hanya dapat digunakan sebagai pendekatan ketika jarak antarrod cukup jauh. Apabila 20 batang rod dipasang dalam jarak yang relatif dekat, daerah penyebaran arus dari masing-masing rod dapat saling beririsan. Kondisi tersebut menyebabkan kontribusi setiap penambahan rod menjadi semakin kecil sehingga tahanan total aktual tidak menurun secara linear sesuai dengan jumlah rod yang dipasang.

Faktor lain yang memengaruhi hasil pengukuran adalah kualitas sambungan antara konduktor grid, ground rod, klem, dan penghantar utama pembumian. Sambungan yang kurang kuat, permukaan konduktor yang mengalami korosi, atau penggunaan klem yang tidak sesuai dapat menambah resistansi pada sistem. Tahanan tambahan pada sambungan tersebut sering kali tidak diperhitungkan dalam model teoritis, tetapi memberikan pengaruh terhadap nilai tahanan yang terukur di lapangan.

Walaupun terdapat perbedaan cukup besar antara hasil teoritis dan hasil pengukuran, penerapan MGGS tetap memberikan hasil yang positif. Sebelum pemasangan MGGS, tahanan pembumian Tower T.213 tercatat sebesar 8,46 Ω . Setelah sistem MGGS diterapkan, tahanan tersebut menurun menjadi 4,46 Ω . Dengan demikian, terjadi penurunan sebesar 4,00 Ω atau 47,28% dari kondisi awal.

Penurunan sebesar 47,28% menunjukkan bahwa MGGS efektif meningkatkan kinerja sistem pembumian Tower T.213. Keberadaan grid memperluas area penyebaran arus secara horizontal, sedangkan ground rod membantu mengalirkan arus menuju lapisan tanah yang lebih dalam. Kedua komponen tersebut bekerja secara terintegrasi dalam mengurangi tahanan pembumian dan memperbesar kemampuan tanah dalam menerima serta menyebarkan arus gangguan.

Nilai tahanan pembumian yang lebih rendah dapat mempercepat proses penyaluran arus gangguan ke tanah. Kondisi ini penting untuk mendukung kinerja peralatan proteksi dan mengurangi potensi munculnya beda potensial yang berbahaya di sekitar kaki tower. Penurunan tahanan juga dapat mengurangi risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dapat membahayakan petugas maupun masyarakat yang berada di sekitar instalasi.

Hasil penelitian ini sekaligus menunjukkan bahwa evaluasi keberhasilan MGGS tidak seharusnya hanya didasarkan pada hasil perhitungan teoritis. Pengukuran langsung di lapangan tetap diperlukan

karena karakteristik tanah, susunan elektroda, kualitas pemasangan, dan kondisi lingkungan dapat menyebabkan hasil aktual berbeda dari hasil perencanaan. Oleh karena itu, hasil perhitungan perlu digunakan sebagai dasar desain awal, sedangkan hasil pengukuran digunakan untuk menilai efektivitas nyata sistem setelah pemasangan.

Secara keseluruhan, penerapan Mesh Grid Grounding System pada Tower T.213 Pekalongan– Sukamerindu terbukti mampu memperbaiki kinerja sistem pembumian. Meskipun nilai hasil pengukuran belum mencapai nilai ideal berdasarkan perhitungan, penurunan dari 8,46 Ω menjadi 4,46 Ω membuktikan bahwa kombinasi grid dan ground rod memberikan kontribusi yang signifikan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa MGGS dapat digunakan sebagai salah satu alternatif teknis untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem transmisi tenaga listrik, dengan tetap memperhatikan kondisi tanah dan mutu pemasangan di lapangan

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan, analisis, dan pembahasan mengenai sistem pembumian tower transmisi 70 kV dengan menggunakan metode Mesh Grid Grounding System (MGGS) pada Tower T.213 Pekalongan – Sukamerindu, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

Penerapan sistem Mesh Grid Grounding System (MGGS) dengan konfigurasi grid seluas 6 m × 6 m, panjang total konduktor grid 66 m, serta penambahan 20 batang ground rod dengan kedalaman 2 m di lokasi Tower T.213 sebesar 48,7 Ω m tergolong sedang, sehingga diperlukan sistem pembumian yang efektif untuk menurunkan nilai tahanan pentanahan.

Hasil pengukuran tahanan pembumian sebelum penerapan MGGS sebesar 8,46 Ω , sedangkan setelah penerapan MGGS nilai tahanan pembumian menurun menjadi 4,46 Ω .

Penurunan nilai tahanan pembumian sebesar 4,00 Ω atau sekitar 47,3% menunjukkan bahwa metode MGGS sangat efektif dalam memperbaiki sistem pembumian pada Tower T.213

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metode perhitungan atau simulasi yang mempertimbangkan interaksi antara grid dan rod serta interaksi antar-ground rod. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menghasilkan nilai teoritis yang lebih mendekati hasil pengukuran lapangan.

Perhitungan berikutnya dapat menggunakan model tanah dua lapis atau multilapis agar variasi tahanan jenis tanah pada setiap kedalaman dapat diperhitungkan. Pemodelan ini dapat mengurangi perbedaan antara hasil perhitungan dan hasil pengukuran.

Penelitian lanjutan sebaiknya dilakukan pada beberapa tower dengan karakteristik tanah, jumlah rod, luas grid, dan kondisi lingkungan yang berbeda. Hal tersebut diperlukan untuk mengetahui konsistensi efektivitas MGGS serta memperluas penerapan hasil penelitian pada sistem transmisi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar Wirayuda, Zuraidah Tharo, Parlin Siagian, 2025 “Analisis Kinerja Lightning Arrester (LA) pada Pemancar Radio Di Gedung RRI Medan” Jurnal Nasional Teknologi Komputer Vol.x Vol 5; No: 3; Juli 2025 E-ISSN: 2808-4845; P-ISSN: 2808-7801 Website: publikasi.hawari.id/index.php/jnastek
- Badan Standardisasi Nasional, PUIL 2011: Persyaratan Umum Instalasi Listrik, Jakarta: BSN, 2011
- C. Andrawadi, J. Simbolon, M. A. Rizky, H. Bawamenewi, Z. Tharo, dan B. Simbolon, “Optimalitas Instalasi Listrik Rumah Tangga Tipe 36 Dalam Konteks Pemenuhan Standar Keselamatan dan Kebutuhan Energi di Kota Medan,” Journal of Telecommunication and Electrical Scientific, vol. 1, no. 2, 2024, doi:10.24010/jtels.v1i2.933
- IEEE Standards Association. (2013). IEEE Std 80-2013: Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, NY: IEEE
- IEEE Standards Association. (2012). IEEE Std 81-2012: Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York, NY: IEEE
- IEEE Standards Association. (2007). IEEE Std 142-2007 (Green Book): Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. New York, NY: IEEE
- IEC, IEC 62305-3: Protection Against Lightning – Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard, Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2010

- IEC, IEC 60364-5-54: Low-Voltage Electrical Installations – Part 5-54: Selection and Erection of Electrical Equipment – Earthing Arrangements and Protective Conductors, Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2011
- IEEE Standards Association, IEEE Std 142-2007 (Green Book): Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, New York, NY, USA: IEEE, 2007
- IEEE Standards Association, IEEE Std 80-2013: Guide for Safety in AC Substation Grounding, New York, NY, USA: IEEE, 2013
- IEEE Standards Association, IEEE Std 81-2012: Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, New York, NY, USA: IEEE, 2012
- International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 62305-3: Protection Against Lightning – Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard. Geneva: IEC
- International Electrotechnical Commission. (2011). IEC 60364-5-54: Low-Voltage Electrical Installations – Part 5-54: Selection and Erection of Electrical Equipment – Earthing Arrangements and Protective Conductors. Geneva: IEC
- J. A. P. Sihombing, D. Erivianto, dan S. Anisah, "Analisis Sistem Pembumian Pada Tower Transmisi 150 kV Segmen Titi Kuning–Berastagi," INTECOMS: Journal of Information Technology and Computer Science, vol. 8, no. 2, 2024
- J. Nahman and D. Salamon, "A practical approach for calculation of grounding resistance of complex grounding systems," Electric Power Systems Research, vol. 60, no. 2, pp. 105–112, 2002
- Tarigan, Bastanta, Parlin Siagian, and Muhammad Erpandi Dalimunthe. "Analysis of Grounding Resistance Value Improvement on 150 kV Glang-Namorambe High Voltage Air Line Tower (SUTT) using three Measurement Points (Three Point Method)." INFOKUM 13.06 (2025): 1971-1982
- Z. Tharo, A. D. Tarigan, S. Anisah, dan D. Banjarnahor, "Performance of Neutral Grounding Resistance and Solid Grounding on 60 MVA Power Transformer," International Journal of Research in Vocational Studies (IJRVOCAS), vol. 2, no. 4, 2023, doi:10.53893/ijrvocas.v2i4.172