

ANALISIS TEGANGAN LANGKAH DAN TEGANGAN SENTUH PADA SISTEM PENTANAHAN GARDU INDUK 150 KV CENDANA PLN UPT PONTIANAK

Antonius Rajagukguk¹, Usman A. Gani², Danial³

antoniusrajagukguk45@gmail.com¹, usmanagani@ymail.com², danial.noah@ee.untan.ac.id³

Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Sistem pentanahan pada Gardu Induk memegang peranan krusial dalam menjamin keselamatan personel dan keandalan peralatan, terutama saat terjadi gangguan fasa ke tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat keamanan sistem pentanahan pada Gardu Induk 150 kV Cendana dengan meninjau dua aspek utama yaitu pengaruh variasi arus gangguan fasa ke tanah dan variasi jenis tanah terhadap performa sistem pentanahan. Metodologi yang digunakan adalah pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP (Electrical Transient Analyzer Program), dengan perbandingan dua skenario konfigurasi sistem pentanahan, yaitu sistem tanpa pagar dan sistem dengan pagar yang dihubungkan ke grid pentanahan utama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa resistansi pentanahan rata-rata adalah sebesar 0,8 Ω . Variasi arus gangguan fasa ke tanah menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kenaikan Ground Potential Rise (GPR), dengan pola peningkatan linier. Semakin besar arus gangguan, maka GPR, tegangan langkah, dan tegangan sentuh yang dihasilkan juga meningkat. Namun demikian, tegangan langkah sebenarnya (448,41 V dan 277,8 V) serta tegangan sentuh (484 V dan 584,7 V) masih berada dalam batas aman yang diizinkan, yaitu batas tegangan langkah untuk 50 kg dan 70 kg (4197,8 V dan 5681,6 V) sementara batas tegangan sentuh untuk 50 kg dan 70 kg (1172,5 V dan 1586,9 V). Sementara itu, variasi jenis tanah juga berpengaruh langsung terhadap performa sistem pentanahan. Semakin tinggi resistivitas tanah, maka nilai resistansi pentanahan, GPR, serta tegangan langkah dan sentuh yang sebenarnya akan meningkat secara signifikan. Pada jenis tanah dengan resistivitas tinggi, nilai tegangan sentuh yang dihasilkan bahkan melebihi batas aman yang diizinkan, menandakan adanya potensi bahaya keselamatan. Selain itu, penyambungan pagar ke grid terbukti efektif dalam menurunkan resistansi total sistem (R_g) dan GPR secara keseluruhan. Namun, konfigurasi ini menimbulkan peningkatan tegangan langkah dan tegangan sentuh di area luar pagar, terutama pada titik sudut (fenomena corner effect) yang menjadi titik paling kritis. Dari keseluruhan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa meskipun sistem pentanahan Gardu Induk 150 kV Cendana masih mampu menjaga tegangan langkah dan tegangan sentuh dalam batas aman, nilai resistansi pentanahan yang melebihi standar SPLN T5.012 ($\leq 0,5 \Omega$) menunjukkan bahwa sistem perlu ditingkatkan lebih lanjut. Penelitian ini menegaskan pentingnya perancangan sistem pentanahan yang mempertimbangkan variasi arus gangguan dan jenis tanah secara menyeluruh untuk memastikan keamanan dan keandalan gardu induk.

Kata Kunci: Sistem Pentanahan, Ground Potential Rise, Tegangan Langkah, Tegangan Sentuh, Pagar Gardu Induk, IEEE Std 80, SPLN T5.012, ETAP.

PENDAHULUAN

Sistem pentanahan yang baik merupakan kebutuhan vital dalam sistem pembangkit, transmisi, dan distribusi tenaga listrik untuk meminimalkan risiko kegagalan peralatan. Di gardu induk mana pun, sistem pentanahan yang baik menyediakan jalur resistivitas rendah untuk mengalirkan arus gangguan tinggi ke tanah. Hal ini akan mengurangi waktu henti, kemungkinan kerusakan peralatan, dan potensi adanya korban jiwa akibat aliran listrik, baik dari petir maupun arus gangguan. Pentanahan merupakan faktor yang paling penting untuk meningkatkan keamanan sistem tenaga dan peralatan listrik, kondisi tanah berpengaruh terhadap nilai resistansi dalam proses pentanahan listrik. Pentanahan diperlukan untuk

pengoperasian yang andal dari setiap peralatan listrik termasuk generator, transformator, sistem transmisi, dan instalasi sistem tenaga lainnya.

Dalam sistem pentanahan, studi tentang resistensi tanah sangat penting dalam merancang jaringan listrik yang aman baik untuk perumahan, komersial, dan kawasan industri. Pentanahan yang baik sesuai dengan standar PUIL (Persyaratan Umum Instalasi Listrik) tahun 2000 bahwa standar untuk tahanan pentanahan yang berlaku tidak boleh lebih dari 5Ω ($\leq 5 \Omega$) namun pada daerah yang memiliki tahanan jenis tanah yang cukup tinggi maka standar maksimumnya adalah 10Ω [1]. Menurut SPLN T5.012, "Pembumihan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi," no. 0053, 2020, batas tahanan pentanahan yang disarankan adalah $\leq 0,5$ [13]. Sementara dalam standar IEEE Std 80-2000, pentanahan yang baik dan ideal harus memberikan nilai tahanan pentanahan mendekati 0 atau ≤ 1 ohm [8].

Sistem pentanahan pada gardu induk memiliki peran penting dalam menjamin keselamatan operator dan peralatan listrik serta kelancaran operasi jaringan tenaga listrik. Pentanahan yang baik mampu mengurangi risiko tegangan langkah dan sentuh yang dapat menyebabkan bahaya listrik pada manusia dan kerusakan peralatan. Penggunaan perangkat lunak seperti ETAP 21.0 memudahkan proses analisis dan simulasi pada sistem pentanahan, terutama dalam menghadapi peningkatan beban dan kondisi gangguan.

Pada penelitian ini yaitu pada gardu induk 150 kV Cendana, studi sistem pentanahan menjadi sangat penting karena tingginya risiko gangguan arus listrik yang dapat meningkatkan potensi bahaya. Dengan menggunakan ETAP 21.0, studi dapat dilakukan untuk menganalisis efisiensi dan keandalan dari sistem pentanahan yang ada, sehingga desain sistem pentanahan yang lebih optimal dapat direkomendasikan.

Salah satu gardu induk yang merupakan bagian dari ULTG (Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk) Pontianak adalah gardu induk 150 kV Cendana. Gardu induk ini termasuk menarik perhatian untuk diteliti, dimana gardu induk ini merupakan gardu induk yang tergolong baru di Pontianak, dimana gardu induk ini mulai beroperasi pada masa pandemi covid 19 tepatnya tahun 2021 demi meningkatkan keandalan sistem kelistrikan khatulistiwa. Pembangunan gardu induk cendana dilakukan karena semakin meningkatnya beban listrik di salah satu gardu induk di Pontianak. Sistem pentanahan di gardu induk memegang peranan penting dalam menjaga keselamatan operasional dan melindungi peralatan dari kerusakan akibat gangguan listrik. Salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam sistem pentanahan adalah analisis tegangan langkah dan tegangan sentuh, yang berfungsi untuk memastikan keamanan personel maupun masyarakat di sekitar gardu induk.

Pada gardu induk 150 kV Cendana belum pernah dilakukan perhitungan terkait potensi ground potential rise terhadap tegangan langkah dan tegangan sentuh dan belum pernah ada penelitian terkait hal tersebut. Kondisi ini menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk mengevaluasi sistem pentanahan guna memastikan bahwa desain yang ada memenuhi standar keselamatan yang ditetapkan. UPT Pontianak menanggapi hal tersebut dan menyatakan ketertarikannya dan menegaskan perlunya data hasil penelitian ini sebagai acuan dalam pengelolaan dan pengembangan sistem pentanahan di gardu tersebut.

Sistem pentanahan pada gardu induk memiliki peranan yang sangat penting dalam menjamin keselamatan operasional dan perlindungan terhadap personel serta masyarakat di sekitarnya. Gardu Induk 150 kV Cendana, yang dikelola oleh PLN UPT Pontianak, merupakan salah satu gardu induk strategis dalam sistem distribusi listrik di Kalimantan Barat. Namun, hingga saat ini, belum pernah dilakukan perhitungan awal terkait potensi kenaikan potensial tanah terhadap tegangan langkah dan tegangan sentuh, belum ada penelitian mendalam yang mengkaji fenomena Ground Potential Rise (GPR) serta bahaya terkait parameter-parameter tersebut pada sistem pentanahan gardu ini.

Kondisi geografis dan karakteristik tanah di Pontianak menambah kompleksitas dalam desain sistem pentanahan. Tanah di Pontianak didominasi oleh jenis tanah gambut, yang memiliki resistivitas tanah yang berbeda dibandingkan tanah mineral lainnya. Pada pembangunan gardu induk di wilayah ini, tanah gambut biasanya dikorek dan diganti dengan tanah kuning yang menyerupai tanah liat untuk meningkatkan daya dukung tanah. Selanjutnya, permukaan tanah dilapisi dengan batu koral guna meningkatkan kestabilan mekanis dan resistivitas permukaan tanah. Namun, bagaimana pengaruh karakteristik ini terhadap kenaikan GPR dan tegangan langkah maupun tegangan sentuh belum pernah menjadi subjek penelitian sebelumnya.

Ground Potential Rise (GPR) merupakan salah satu parameter penting yang harus dianalisis untuk memastikan bahwa sistem pentanahan memenuhi standar keselamatan internasional, seperti IEEE Std. 80-2013. Kenaikan GPR yang signifikan dapat menyebabkan tegangan langkah dan tegangan sentuh yang melebihi ambang batas aman, sehingga berpotensi membahayakan manusia dan peralatan. Oleh karena itu, evaluasi terhadap sistem pentanahan dengan mempertimbangkan kondisi lokal, seperti karakteristik tanah dan metode konstruksi, sangat penting untuk dilakukan.

Melihat akan hal ini mendorong peneliti untuk terjun melakukan studi baik di lapangan maupun analisa dengan menggunakan perangkat simulasi, dan dikarenakan sebelumnya belum pernah ada yang melakukan studi dan penelitian mengenai keamanan dan keandalan sistem pentanahan di gardu induk tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis Ground Potential Rise (GPR) pada sistem pentanahan Gardu Induk 150 kV Cendana di PLN UPT Pontianak dengan menggunakan metode simulasi dan perhitungan teknis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang komprehensif mengenai kinerja sistem pentanahan gardu serta memberikan rekomendasi perbaikan yang diperlukan.

Penelitian ini difokuskan pada analisis potensi ground potential rise terhadap tegangan langkah dan tegangan sentuh pada sistem pentanahan di gardu induk 150 kV Cendana dan simulasi menggunakan ETAP 21.0. Penelitian ini dilakukan untuk evaluasi sistem pentanahan dalam memperoleh kenaikan potensial tanah, nilai tahanan pentanahan serta tegangan langkah dan sentuh sesuai standar IEEE Std. 80-2013. Perhitungan untuk parameter-parameter yang akan dihitung menggunakan metode IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sementara untuk simulasi menggunakan 2 metode yaitu IEEE dan FEM (Finite Element Method) atau biasa disebut metode Elemen Hingga.

Berdasarkan latar belakang ini, penelitian dengan pendekatan analisis perbandingan perhitungan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan memberikan gambaran komprehensif mengenai performa sistem pentanahan di gardu induk, dengan fokus pada potensi kenaikan potensial tanah terhadap tegangan langkah, tegangan sentuh, serta parameter keselamatan lainnya sesuai standar IEEE. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi langkah awal dalam meningkatkan keamanan sistem kelistrikan di gardu induk 150 kv cendana sekaligus mendukung kebutuhan operasional pihak UPT Pontiana.

METODOLOGI

Metode penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tegangan langkah dan tegangan sentuh pada sistem pentanahan Gardu Induk 150 kV Cendana di PLN UPT Pontianak. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan pengumpulan data berupa spesifikasi sistem pentanahan dan data arus gangguan. Sistem pentanahan yang digunakan adalah jenis grid-rod dengan konduktor horizontal dan rod vertikal yang ditanam di bawah

permukaan tanah. Alat yang digunakan meliputi earth tester untuk mengukur resistansi tanah, laptop dengan software ETAP 21.0 untuk simulasi sistem pentanahan, serta kalkulator dan alat tulis untuk membantu perhitungan.

Prosedur penelitian dimulai dengan studi literatur untuk memperoleh dasar teori dan referensi, dilanjutkan dengan survei lapangan dan pengumpulan data langsung di lokasi gardu induk. Data yang dikumpulkan mencakup hasil pengujian resistansi pentanahan, data arus gangguan, jenis tanah, dan spesifikasi sistem. Tahap pelaksanaan mencakup perhitungan nilai resistansi, Ground Potential Rise (GPR), tegangan langkah, dan tegangan sentuh menggunakan rumus yang sesuai. Selanjutnya, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP dengan memasukkan seluruh data spesifikasi sistem pentanahan untuk memperoleh hasil visual dan numerik dari variabel-variabel tersebut.

Tahap akhir dari penelitian adalah analisis data dan validasi hasil. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi ETAP dengan hasil pengukuran dan perhitungan manual. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan sistem pentanahan dan menilai apakah hasilnya sudah memenuhi standar keselamatan seperti yang ditetapkan oleh IEEE. Validasi juga dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian ini dengan data uji sebelumnya dan penelitian terdahulu untuk memastikan akurasi serta keabsahan temuan. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam penarikan kesimpulan mengenai efektivitas sistem pentanahan pada gardu induk tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dilakukan pengolahan data dengan perhitungan dan simulasi analisis tegangan langkah dan tegangan sentuh berdasarkan data yang telah diperoleh pada sistem pentanahan Gardu Induk 150 kV Cendana PLN UPT Pontianak.

Pembahasan difokuskan untuk menjawab rumusan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya, dengan penekanan pada pengaruh arus gangguan fasa ke tanah terhadap Ground Potential Rise (GPR), tegangan langkah, dan tegangan sentuh. Kemudian dilakukan analisis pengaruh karakteristik jenis tanah terhadap nilai tahanan pentanahan, serta bagaimana dampaknya pada nilai GPR, tegangan langkah, dan tegangan sentuh yang muncul. Hasil perhitungan dibandingkan dengan standar keselamatan yang berlaku, seperti IEEE Std 80-2013, untuk menilai apakah sistem pentanahan telah memenuhi kriteria proteksi yang memadai.

Perhitungan Resistansi Pentanahan

Untuk menghitung besar resistansi pentanahan terlebih dahulu harus dilakukan perhitungan nilai L yaitu panjang total konduktor pentanahan dan A yaitu luas area sistem pentanahan gardu induk 150 Kv Cendana. Untuk menghitung L dan A dapat menggunakan persamaan (2.5) berikut.

$$L_T = L_c + L_r$$

$$A = L_1 \times L_2$$

Keterangan:

$$L_c = L_1 \cdot n + L_2 \cdot m$$

$$L_r = \text{panjang konduktor rod} \times \text{jumlah konduktor rod}$$

$$n = \text{jumlah grid sumbu } x$$

$$m = \text{jumlah grid sumbu } y$$

Dimana:

$$n = \frac{L_1}{D_1} + 1$$

$$= \frac{45 \text{ m}}{14 \text{ m}} + 1$$

$$\begin{aligned}
&= 4,2 \text{ buah} \\
m &= \frac{L_2}{D_2} + 1 \\
&= \frac{60 \text{ m}}{5 \text{ m}} + 1 \\
&= 13 \text{ buah}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_c &= 60 \text{ m} \times 4,2 + 45 \text{ m} \times 13 \\
&= 837 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_r &= 3 \times 54 \text{ m} \\
&= 162 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_T &= 837 \text{ m} + 162 \text{ m} \\
&= 999 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A &= 60 \text{ m} \times 45 \text{ m} \\
&= 2700 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

Untuk menghitung nilai resistansi pentanahan menggunakan persamaan (2.5)

$$\begin{aligned}
R_g &= \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \\
&= 90 \Omega \left[\frac{1}{999 \text{ m}} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 2700 \text{ m}^2}} \left(1 + \frac{1}{1+0,5 \text{ m} \sqrt{20/2700 \text{ m}^2}} \right) \right] \\
&= 0,85 \Omega
\end{aligned}$$

Hasil Pengukuran Resistansi Pentanahan

Tabel 1 Hasil Pengukuran Resistansi Pentanahan Oleh PLN UPT Pontianak

Bay	MTU	Fasa	Nilai Tahanan Ω	Tanggal Pelaksanaan
Line Cendana - Kota Baru	LA	R	0,83	13 Februari 2025
Line Cendana - Kota Baru	LA	S	0,83	13 Februari 2025
Line Cendana - Kota Baru	LA	T	0,82	13 Februari 2025
Line Cendana - Siantan	PMT	R	0,8	13 Februari 2025
Line Cendana - Siantan	PMT	S	0,8	13 Februari 2025
Line Cendana - Siantan	PMT	T	0,79	13 Februari 2025
Coupler	PMT	R	0,83	13 Februari 2025
Coupler	PMT	S	0,82	13 Februari 2025
Coupler	PMT	T	0,81	13 Februari 2025
Trafo 1	PMT	R	0,8	13 Februari 2025
Trafo 1	PMT	S	0,83	13 Februari 2025
Trafo 1	PMT	T	0,81	13 Februari 2025
Trafo 1	Body Trafo		0,8	13 Februari 2025

Perhitungan Arus Grid Simetris

Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui berapa nilai dari arus grid simetris (I_g). Dari data pentanahan gardu induk 150 Kv Cendana diperoleh nilai untuk arus gangguan fasa tunggal ke tanah maksimum adalah sebesar 4,9 kA dan nilai faktor pembagi arus adalah 0,6 atau 60%. Untuk menghitung I_g menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} I_g &= S_f \times I_f \\ &= 60 \% \times 4900 A \\ &= 2940 A \end{aligned}$$

Perhitungan Arus Grid Maksimum

Arus Grid Maksimum dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$I_G = D_f \times I_g$$

Dimana:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_A}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_A}}\right)}$$

$$T_A = \frac{X}{R} \times \frac{1}{2\pi f}$$

$$T_A = 10 \times \frac{1}{2\pi 50}$$

$$T_A = 0,0318$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0,0318}{0,5} \left(1 - e^{-\frac{2 \times 0,5}{0,0318}}\right)}$$

$$D_f = 1,031$$

maka,

$$I_G = 1,031 \times 2940 A$$

$$I_G = 3031,14 A$$

Perhitungan Ground Potential Rise

Untuk menghitung nilai *Ground Potential Rise* dapat menggunakan persamaan (2.7) berikut.

$$GPR = I_G \times R_g$$

$$GPR = 3031,14 A \times 0,85 \Omega$$

$$GPR = 2576 V$$

Perhitungan Faktor Reduksi

Perhitungan ini dilakukan untuk memperoleh nilai dari faktor reduksi yang dimana faktor reduksi digunakan untuk menghitung nilai dari tegangan langkah dan tegangan sentuh. Untuk menghitung faktor reduksi menggunakan persamaan berikut.

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09}$$

$$= 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{90}{5000}\right)}{2 \times 0,2 + 0,09}$$

$$= 0,82$$

Perhitungan Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh yang Diizinkan

a. Tegangan langkah yang diizinkan

Untuk menghitung tegangan langkah yang diizinkan dengan berat badan manusia 50 kg dan 70 kg dapat menggunakan persamaan berikut.

$$E_s = I_k(R_k + 6C_s\rho_s)$$

Berat badan 50 kg:

$$E_{s50} = (1000 \Omega + 6C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 \Omega + 6 \times 0,82 \times 5000 \Omega\text{-m}) \frac{0.116}{\sqrt{0,5}}$$

$$= 4197,84 \text{ V}$$

Berat badan 70 kg:

$$E_{s70} = (1000 \Omega + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 \Omega + 6 \times 0,82 \times 5000 \Omega\text{-m}) \frac{0.157}{\sqrt{0,5}}$$

$$= 5681,56 \text{ V}$$

b. Tegangan sentuh yang diizinkan

Untuk menghitung tegangan sentuh yang diizinkan dengan berat badan manusia 50 dan 70 kg dapat menggunakan persamaan berikut.

$$E_t = I_k(R_k + 1.5C_s\rho_s)$$

Berat badan 50 kg:

$$E_{t50} = (1000 \Omega + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 \Omega + 1.5 \times 0,82 \times 5000 \Omega\text{-m}) \frac{0.116}{\sqrt{0,5}}$$

$$= 1172,50 \text{ V}$$

Berat badan 70 kg:

$$E_{t70} = (1000 \Omega + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 \Omega + 1.5 \times 0,82 \times 5000 \Omega\text{-m}) \frac{0.157}{\sqrt{0,5}}$$

$$= 1586,91 \text{ V}$$

Menurut IEEE Std 80-2013 (*Guide for Safety in AC Substation Grounding*) apabila nilai GPR lebih kecil daripada tegangan sentuh yang diizinkan ($GPR < \text{tegangan sentuh}$), maka dikatakan bahwa sistem pentanahan telah memenuhi standar keamanan. Jika melihat dari hasil pengolahan data diatas didapat nilai GPR 2576 V dan tegangan sentuh yang diizinkan adalah 1172,50 V dan 1586,91 V berarti bahwa nilai GPR lebih besar dari Etouch ($GPR > \text{Etouch}$) maka perlu dilakukan perhitungan lebih lanjut yaitu menghitung nilai tegangan langkah dan tegangan sentuh yang sebenarnya.

Perhitungan Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh yang Sebenarnya

a. Tegangan langkah sebenarnya

Untuk menghitung tegangan langkah sebenarnya dapat menggunakan persamaan () berikut.

$$E_s = \frac{\rho K_s K_t I_G}{L_s}$$

Untuk menyelesaikan perhitungan ini, pertama harus menghitung nilai n menggunakan persamaan berikut.

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p}$$

dimana,

$$L_p = \text{keliling grid}$$

$$L_p = 2(60 \text{ m} + 45 \text{ m})$$

$$L_p = 210 \text{ m}$$

maka,

$$n_a = 2 \times \frac{837 \text{ m}}{210 \text{ m}}$$

$$n_a = 7,97 \text{ buah}$$

$$n_a = 8, \text{ karena}$$

$$n_b = 1 \text{ untuk grid persegi panjang}$$

$$n_c = 1 \text{ untuk grid persegi panjang}$$

$$n_d = 1 \text{ untuk grid persegi panjang}$$

maka,

$$n = 8 \times 1 \times 1 \times 1 = 8 \text{ buah}$$

Faktor K_i dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times n$$

$$= 0,644 + 0,148 \times 8$$

$$= 1,828$$

Faktor K_s dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1-0,5^{N-2}) \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{0,5} + \frac{1}{14+0,5} + \frac{1}{14} (1-0,5^{8-2}) \right]$$

$$= 0.6810$$

Terakhir, menghitung tegangan langkah sebenarnya dapat menggunakan persamaan berikut.

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I G}{L_s}$$

$$= \frac{90 \Omega \times 0,6810 \times 1,828 \times 3031,14 \text{ A}}{757,35 \text{ m}}$$

$$= 448,41 \text{ V}$$

Setelah melakukan perhitungan tegangan langkah sebenarnya, diperoleh besar tegangan langkah sebenarnya adalah 448,41 V. Jika kita bandingkan dengan hasil perhitungan tegangan langkah yang diizinkan, maka nilai tegangan langkah sebenarnya sudah sangat baik dikarenakan tegangan langkah sebenarnya lebih kecil daripada tegangan langkah yang diizinkan (Estep yang diizinkan untuk berat badan 50 kg dan 70 kg adalah 4197,84 V dan 5681,56 V).

b. Tegangan sentuh sebenarnya

Untuk menghitung tegangan sentuh sebenarnya dapat menggunakan persamaan (2.18) berikut.

$$E_t = \frac{\rho K_m K_i I G}{L_m}$$

Untuk menyelesaikan perhitungan ini terlebih dahulu dicari nilai faktor K_m , K_{ii} dan K_h

Faktor K_{ii} dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2.n)^{\frac{2}{n}}}$$

$$= \frac{1}{(2.8)^{\frac{2}{8}}}$$

$$= 0,5$$

Faktor K_h dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$= 1,224$$

Faktor K_m dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right]$$

$$= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{14^2}{16 \times 0,5 \times 16} + \frac{(14+2 \times 0,5)^2}{8 \times 14 \times 16} - \frac{0,5}{4 \times 16} \right) + \frac{0,5}{1,224} \ln \frac{8}{\pi(2 \times 8-1)} \right]$$

$$= 1.0637$$

Terakhir, menghitung tegangan sentuh sebenarnya dapat menggunakan persamaan berikut.

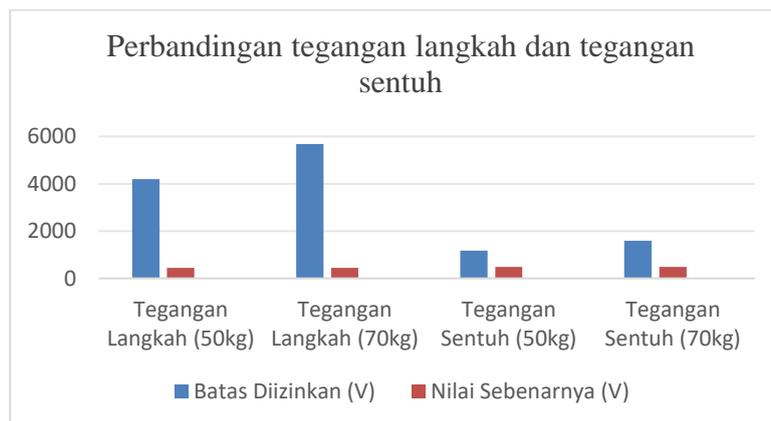
$$E_t = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_m}$$

$$= \frac{90 \Omega \times 1,0637 \times 1,828 \times 3031,14 \text{ A}}{1096,01 \text{ m}}$$

$$= 484 \text{ V}$$

Tabel 2 Hasil perhitungan

No	Parameter	Hasil Perhitungan
1	Resistansi Pentanahan	0,85 Ω
2	Arus Grid Maksimum	3031,14 kA
3	<i>Ground Potential Rise</i>	2576 V
4	Tegangan Langkah yang Diizinkan 50 kg	4197,84 V
5	Tegangan Langkah yang Diizinkan 70 kg	5681,56 V
6	Tegangan Sentuh yang Diizinkan 50 kg	1172,50 V
7	Tegangan Sentuh yang Diizinkan 70 kg	1586,91 V
8	Tegangan langkah yang Sebenarnya	448,41V
9	Tegangan Sentuh yang Sebenarnya	484V



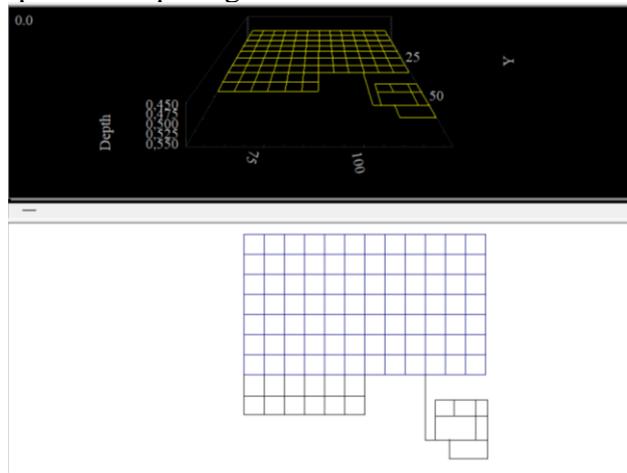
Simulasi Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 Kv Cendana Tanpa Elemen Pagar

Pada sub bab ini akan dilakukan simulasi sistem pentanahan gardu induk 150 Kv Cendana tanpa menambahkan elemen pagar menggunakan *tool grounding system* pada *software* ETAP dengan metode *Finite Element Methode* (FEM). Alasan penggunaan metode FEM untuk simulasi ini adalah karena metode FEM ini menyediakan menu atau pilihan desain penempatang batang rod manual atau mengikuti desain yang ada pada gardu induk.

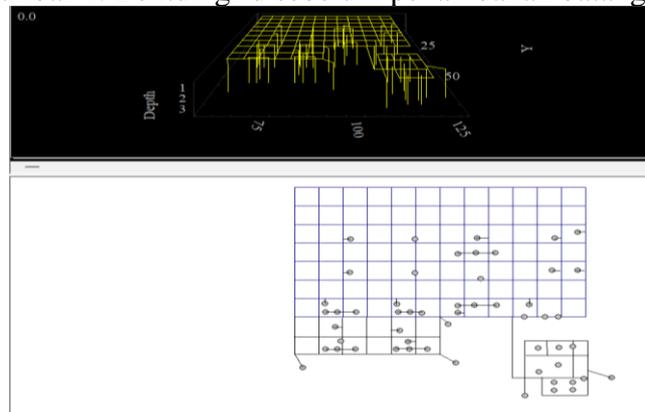
Hal ini juga menyesuaikan dengan desain pentanahan yang ada pada GI Cendana, dimana desain yang digunakan lebih kompleks yaitu penempatan batang rod yang menyebar di berbagai titik menyesuaikan titik tempat alat atau perangkat yang ada pada gardu tersebut. Untuk desain yang seperti ini metode IEEE tidak menyediakan menu atau pilihan desain untuk penempatan batang rod secara manual mengikuti desain dari gardu tersebut. Dalam metode IEEE untuk desain batang rod sendiri sudah tersedia pilihan penempatan batang rod menyebar di sepanjang titik potongan grid atau mesh dan di setiap sudut grid mengikuti standar yang ada pada IEEE Std 80-2013 (*Guide for Safety in AC Substation Grounding*). Menurut IEEE Std 80-2013 (*Guide for Safety in AC Substation Grounding*) untuk penempatang batang rod paling ideal adalah menyebar disepanjang grid dan sudut grid.

Desain Bentuk Pentanahan Grid Dan Rod Pada Gardu Induk 150 Kv Cendana

Bentuk desain pentanahan grid dan rod pada gardu induk 150 Kv Cendana menggunakan etap dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Bentuk grid sebelum penambahan batang rod



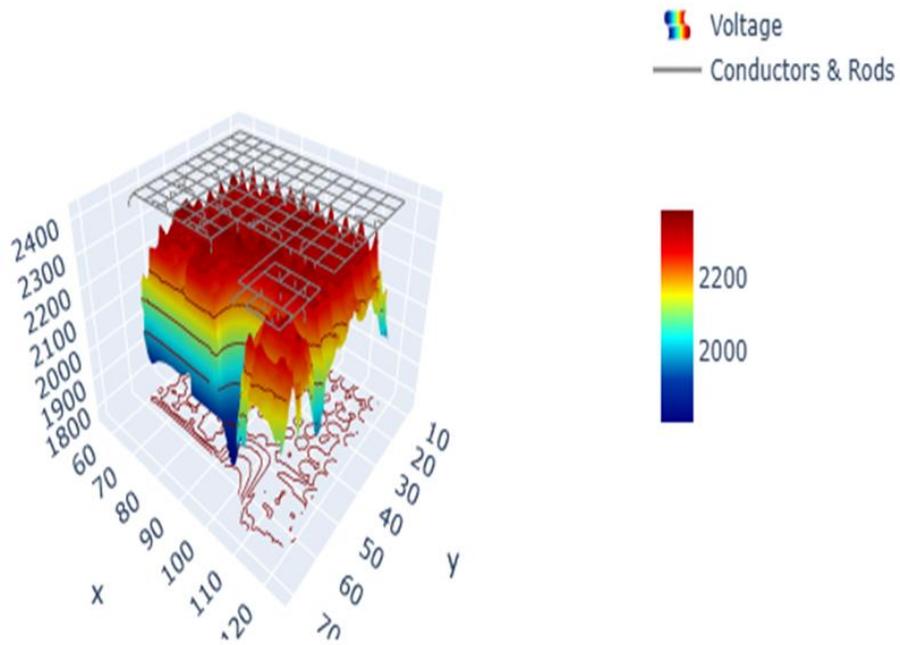
Gambar 2. Desain pentanahan setelah ditambahkan batang rod

Hasil Simulasi Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 Kv Cendana

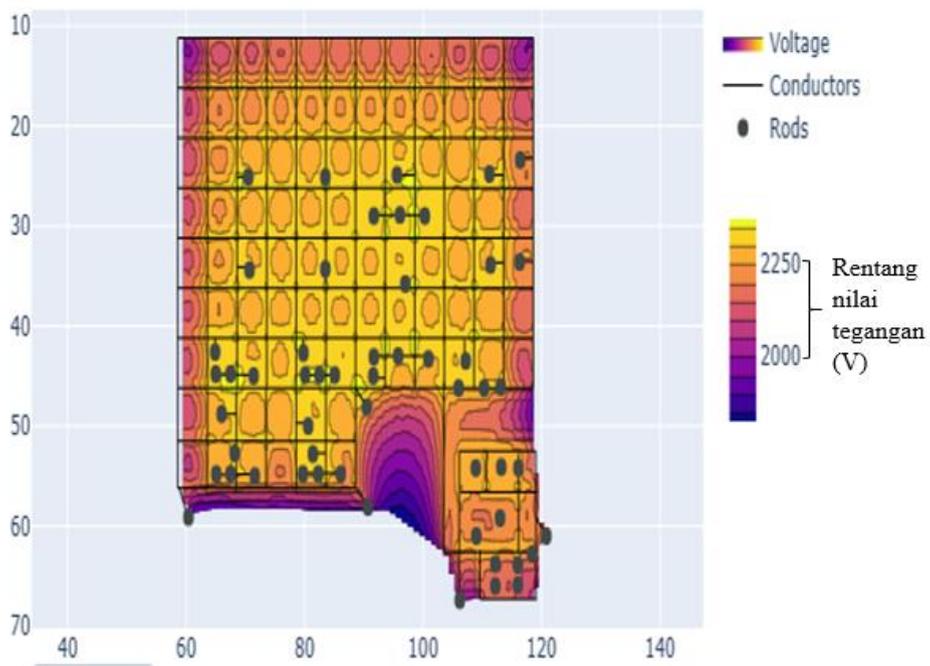
Tabel 3. Hasil simulasi sistem pentanahan gardu induk 150 kV Cendana

No	Parameter	Hasil Simulasi
1	Resistansi Pentanahan (R_g)	0,79 Ω
2	Ground Potential Rise (GPR)	2391,4 V
3	Tegangan Langkah yang Diizinkan 50 kg	4197,8 V
4	Tegangan Langkah yang Diizinkan 70 kg	5681,6 V
5	Tegangan Sentuh yang Diizinkan 50 kg	1172,5 V

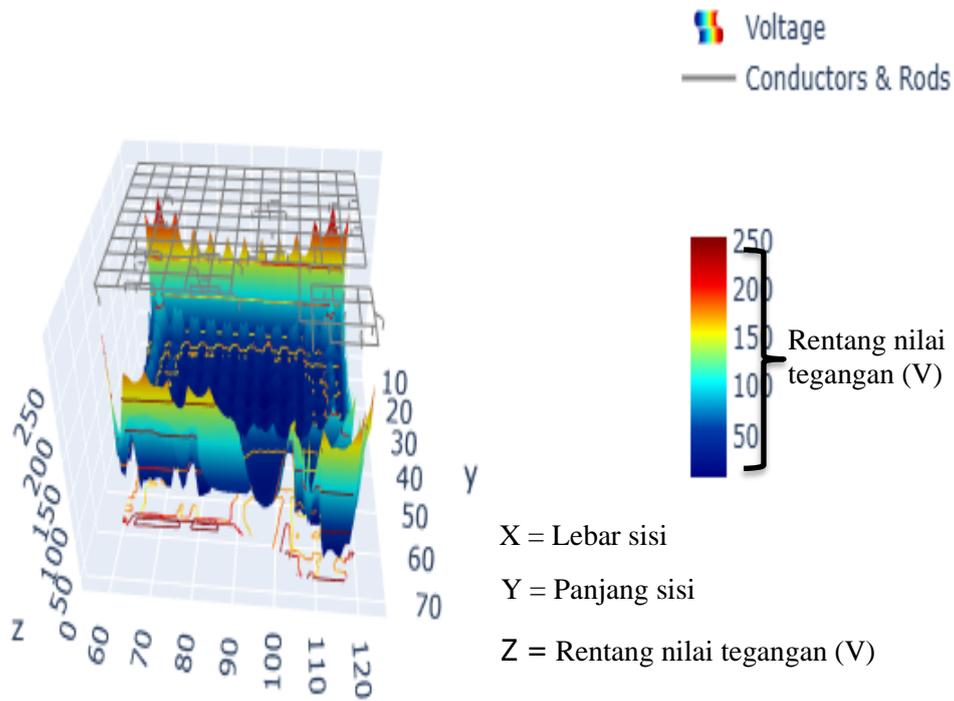
6	Tegangan Sentuh yang Diizinkan 70 kg	1586,9 V
7	Tegangan Langkah yang Sebenarnya	277,8 V
8	Tegangan Sentuh yang Sebenarnya	584,7 V



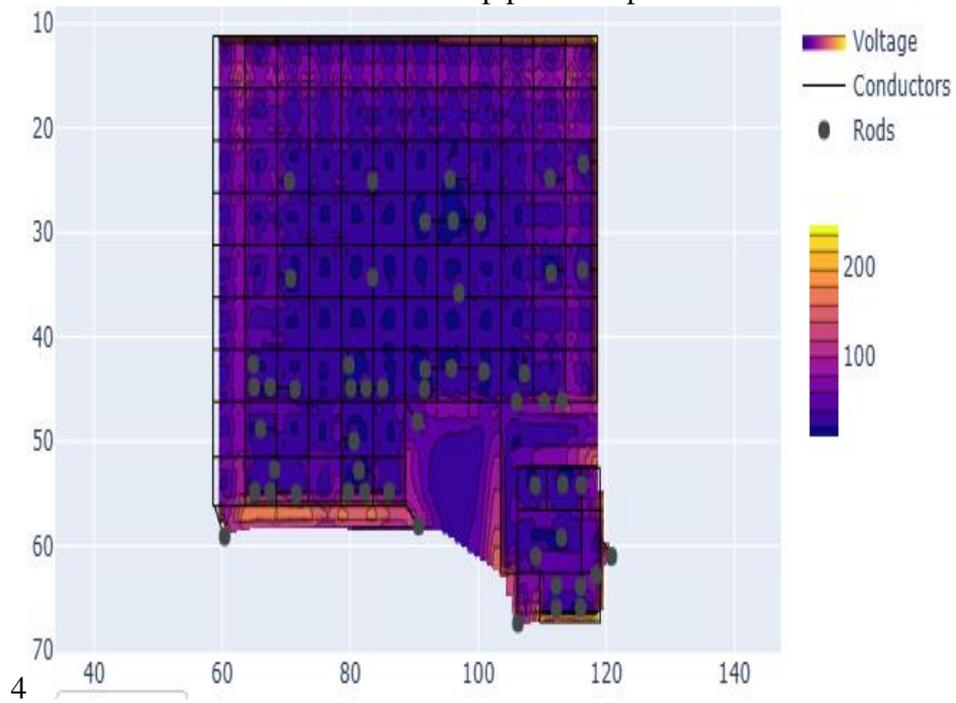
Gambar 5 Plot absolute potential profile



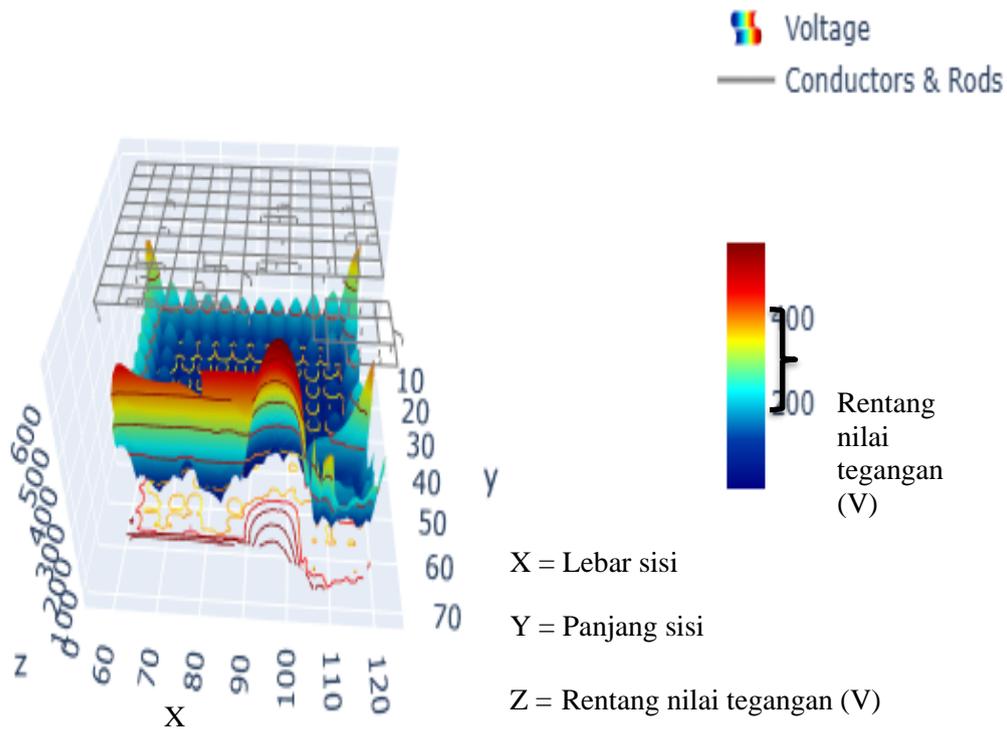
Gambar 3. Plot contour absolute potential profile



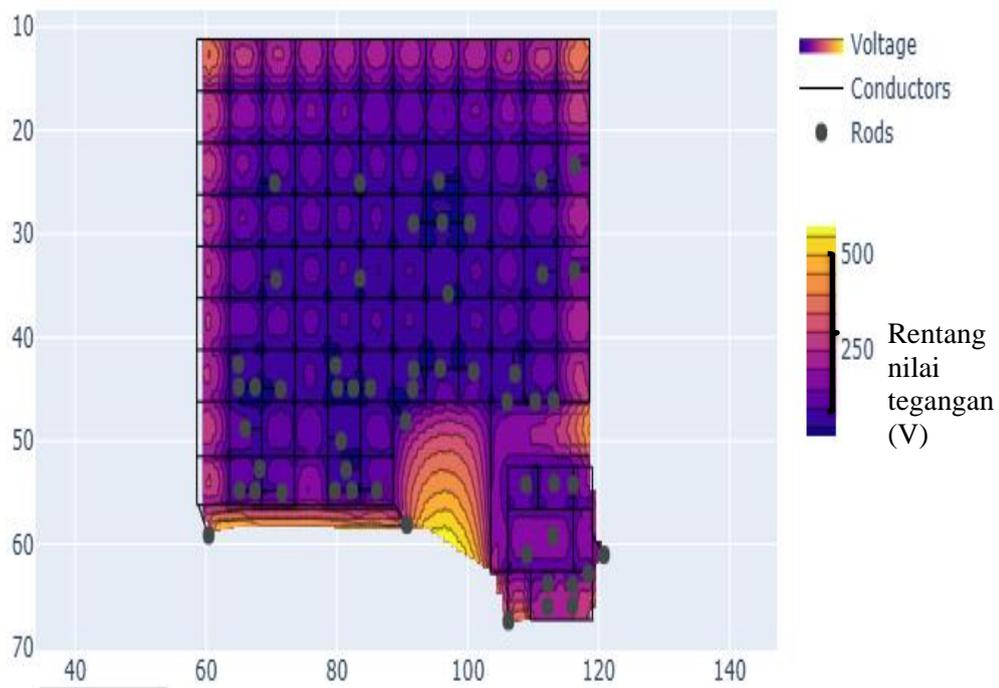
Gambar 4 Plot step potential profile



Gambar 5. Plot contour step potential profile



Gambar 9 Plot touch potential profile



Gambar 6. Plot contour touch potential profile

Gambar grafik 6 – 11 diatas adalah visualisasi 3D dari sebaran tegangan listrik di permukaan tanah di atas sebuah sistem pentanahan (*grounding*) saat terjadi gangguan listrik besar seperti sambaran petir atau korsleting. Grafik ini merupakan sebuah peta kontur tanah

atau lanskap 3D. Namun, alih-alih menunjukkan tinggi-rendahnya permukaan, peta ini menunjukkan tinggi-rendahnya tegangan listrik.

- "Puncak seperti gunung" atau area yang tinggi berarti tegangannya tinggi (berbahaya).
- "Lembah" atau area yang rendah berarti tegangannya lebih rendah (lebih aman).

Penjelasan Skala Warna

Skala di sebelah kanan gambar adalah legenda yang berfungsi sebagai kunci untuk membaca peta tegangan 3D tersebut. Secara konsisten, warna pada grafik ini berfungsi sebagai indikator visual tingkat bahaya:

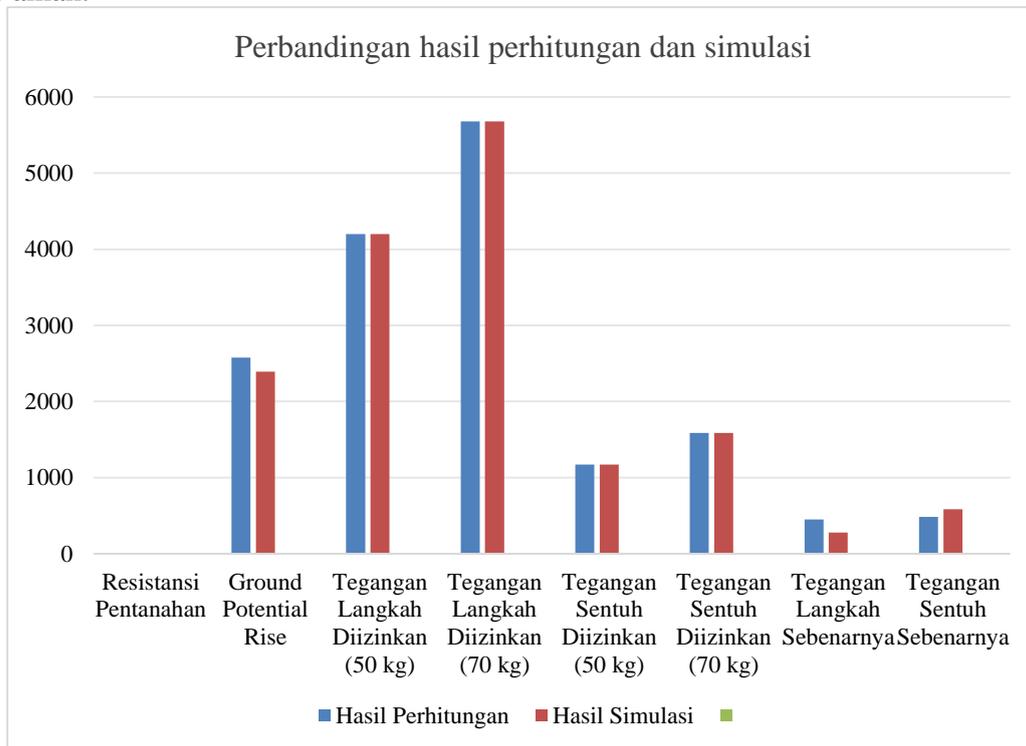
- Warna Panas (Merah, Oranye, Kuning): selalu menandakan tegangan tinggi dan bahaya lebih besar.
- Warna Dingin (Ungu, Biru, Hijau): selalu menandakan tegangan rendah dan area yang lebih aman.

Tabel 4. Perbandingan hasil perhitungan dan simulasi

Parameter	Hasil Perhitungan	Hasil Simulasi
Resistansi Pentanahan	0,85 Ω	0,79 Ω
Ground Potential Rise	2576 V	2391,4 V
Tegangan Langkah yang Diizinkan (50 kg)	4197,84 V	4197,8 V
Tegangan Langkah yang Diizinkan (70 kg)	5681,56 V	5681,6 V
Tegangan Sentuh yang Diizinkan (50 kg)	1172,50 V	1172,5 V
Tegangan Sentuh yang Diizinkan (70 kg)	1586,91 V	1586,9 V
Tegangan Langkah yang Sebenarnya	448,41 V	277,8 V
Tegangan Sentuh yang Sebenarnya	484 V	584,7 V

Berdasarkan hasil perbandingan antara perhitungan manual dan simulasi, terdapat beberapa temuan penting yang perlu diperhatikan, yaitu nilai resistansi pentanahan yang didapat dalam hasil perhitungan manual adalah 0,85 Ω , sedangkan simulasi menghasilkan nilai yang lebih rendah, yaitu 0,79 Ω . Perbedaan sekitar 0,06 Ω ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan asumsi geometri dan didalam simulasi ETAP terdapat beberapa nilai faktor yang dianggap ideal, seperti sambungan konduktor yang dianggap sempurna atau ideal tanpa resistansi tambahan, tanah homogen tanpa lapisan berbeda, batang grounding yang “menancap” sempurna ke dalam tanah yang tepat kedalamannya, dan tidak adanya korosi atau keausan akan membuat nilai GPR, tegangan langkah, maupun tegangan sentuh yang dihasilkan cenderung lebih rendah atau lebih terkontrol daripada yang mungkin terjadi di lokasi sebenarnya. Hasil perhitungan dan simulasi menunjukkan hasil yang sama-sama masih dalam batas aman, dengan kata lain bahwa hasil simulasi ini dapat divalidasi dengan hasil perhitungan. Hasil perhitungan dan simulasi sama sama menunjukkan

bahwasannya desain sistem pentanahan pada gardu induk 150 kV Cendana sudah dalam batas aman.



Pengaruh Arus Gangguan Fasa Ke Tanah

Sesuai dengan perumusan masalah sebelumnya, pada sub bab ini akan dilakukan analisis pengaruh arus gangguan fasa ke tanah terhadap *Ground Potential Rise* (GPR) dan potensinya terhadap tegangan langkah, tegangan sentuh pada sistem pentanahan di Gardu Induk 150 kV Cendana untuk menjawab permasalahan awal. Analisis akan dilakukan dalam bentuk simulasi menggunakan ETAP. Pada pembahasan sebelumnya data arus gangguan yang digunakan adalah data arus gangguan sebenarnya yang ada pada gardu induk Cendana. Untuk menjawab perumusan masalah, maka dilakukan analisis pengaruh arus gangguan dengan data arus gangguan yang di variasikan yaitu sebesar 5 kA, 5,5 kA dan 6 kA . Hasil simulasi dapat dilihat dibawah ini.

Tabel 4 Hasil simulasi pengaruh arus gangguan

Parameter	Hasil Simulasi		
	5 kA	5,5 kA	6 kA
Resistansi Pentanahan	0,79 Ω	0,79 Ω	0,79 Ω
Ground Potential Rise	2440,2	2684,2	2928,3
Tegangan Langkah yang Diizinkan (50 kg)	4197,8	4197,8	4197,8
Tegangan Langkah yang Diizinkan (70 kg)	5681,6	5681,6	5681,6
Tegangan Sentuh yang Diizinkan (50 kg)	1172,5	1172,5	1172,5
Tegangan Sentuh yang Diizinkan (70 kg)	1586,9	1586,9	1586,9
Tegangan Langkah yang Sebenarnya	283,5	311,9	340,2

menjamin keamanan operasional gardu induk dari risiko gangguan tanah.

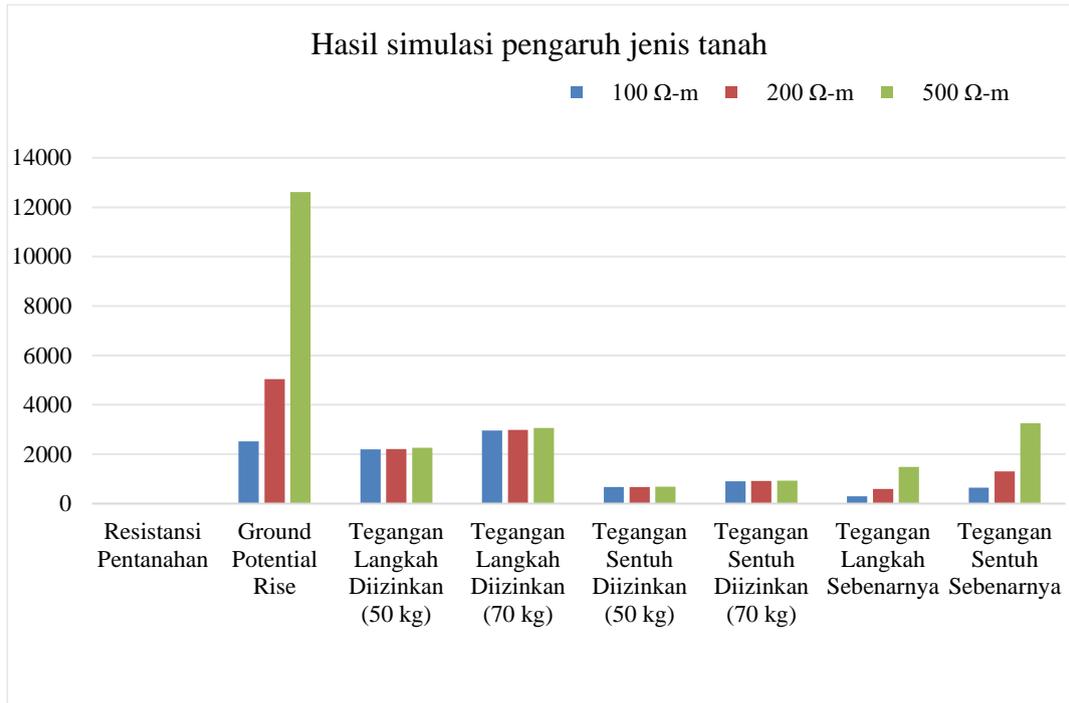
Pengaruh Jenis Tanah

Sesuai dengan perumusan masalah sebelumnya, pada sub bab ini akan dilakukan analisis pengaruh jenis tanah meliputi tahanan jenis tanah terhadap *Ground Potential Rise* (GPR) dan potensinya terhadap tegangan langkah, tegangan sentuh pada sistem pentanahan di Gardu Induk 150 kV Cendana untuk menjawab permasalahan awal. Analisis akan dilakukan dalam bentuk simulasi menggunakan ETAP. Pada pembahasan sebelumnya data jenis tanah yang digunakan adalah jenis tanah kuning atau tanah ladang yang ada pada gardu induk Cendana.

Nilai tahanan jenis tanah yang ada pada gardu induk Cendana adalah 90 Ω untuk kondisi kering dan 30 Ω untuk kondisi basah. Nilai ini juga sesuai dengan data tahanan jenis tanah yang ada pada standar PUIL, dimana disebutkan bahwa nilai tahanan jenis tanah kuning/liat dan tanah ladang rata-rata sebesar 100 Ω . Untuk menjawab perumusan masalah, maka dilakukan analisis pengaruh jenis tanah terhadap sistem pentanahan pada gardu induk Cendana dengan data jenis tanah yang dipakai adalah data jenis tanah yang ada pada *library* ETAP yaitu *moist soil* (tanah lembap) dengan tahanan jenis tanah sebesar 100 Ω dan data jenis tanah yang ada pada PUIL, 2000:80 yaitu pasir basah dan kerikil basah dengan tahanan jenis rata-rata sebesar 200 Ω dan 500 Ω . Hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4.6 dibawah ini.

Tabel 5 Hasil simulasi pengaruh jenis tanah

Parameter	Hasil			
	100 Ω -m	200 Ω -m	500 Ω -m	
Resistansi Pentanahan	0,815 Ω	1,63 Ω	4,076 Ω	
Ground Potential Rise	2522,3 V	5044,6 V	12611,5 V	
Tegangan Langkah yang Diizinkan (50 kg)	2190,9 V	2209 V	2263,2 V	
Tegangan Langkah yang Diizinkan (70 kg)	2965,3 V	2989,7 V	3063,1 V	
Tegangan Sentuh yang Diizinkan (50 kg)	670,8 V	675,3 V	688,8 V	
Tegangan Sentuh yang Diizinkan (70 kg)	907,8 V	914 V	932,3 V	
Tegangan Langkah yang Sebenarnya	296,7 V	593,3 V	1483,3 V	
Tegangan Sentuh yang Sebenarnya	651,7 V	1303,3 V	3258,3 V	



Rumusan masalah kedua dalam penelitian ini adalah "Bagaimana pengaruh jenis tanah terhadap nilai tahanan pentanahan, *Ground Potential Rise* (GPR), tegangan langkah dan tegangan sentuh pada sistem pentanahan gardu induk?".

Untuk menjawab rumusan masalah ini, dilakukan simulasi dengan variasi nilai resistivitas tanah, yaitu sebesar 100 Ω-m, 200 Ω-m, dan 500 Ω-m. Hasil simulasi menunjukkan bahwa resistivitas tanah memberikan pengaruh signifikan terhadap performa sistem pentanahan, terutama terhadap nilai resistansi pentanahan, GPR, serta tegangan langkah dan sentuh yang timbul.

1. Pengaruh terhadap Resistansi Pentanahan:

Nilai resistansi pentanahan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya resistivitas tanah. Pada resistivitas tanah 100 Ω-m, nilai resistansi pentanahan adalah 0,815 Ω. Pada resistivitas tanah 200 Ω-m, nilai resistansi pentanahan meningkat menjadi 1,63 Ω. Sedangkan pada resistivitas tanah 500 Ω-m nilai resistansi pentanahan meningkat secara signifikan menjadi 4,076 Ω. Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin besar resistivitas tanah, maka semakin sulit arus gangguan dibumikan, yang menyebabkan resistansi sistem pentanahan meningkat.

2. Pengaruh terhadap *Ground Potential Rise* (GPR):

Peningkatan resistivitas atau tahanan jenis tanah juga memicu kenaikan *Ground Potential Rise*, karena GPR dihitung dari hasil kali antara arus gangguan dan resistansi pentanahan. Dengan arus gangguan tetap, maka:

Pada 100 Ω-m → GPR = 2522,3 V

Pada 200 Ω-m → GPR = 5044,6 V

Pada 500 Ω-m → GPR = 12611,5 V

Peningkatan GPR ini menunjukkan adanya potensi tegangan tinggi di sekitar sistem pentanahan yang dapat membahayakan peralatan dan personel di sekitar gardu induk.

1. Pengaruh terhadap Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh:

Tegangan langkah dan tegangan sentuh yang sebenarnya juga meningkat seiring meningkatnya resistivitas tanah. Dimana tegangan langkah meningkat menjadi 296,7 V pada tahanan jenis tanah 100 Ω-m, 593,3 V pada tahanan jenis tanah 200 Ω-m, dan 1483,3

V pada tahanan jenis tanah $500 \Omega\text{-m}$. Hal serupa juga terjadi pada tegangan sentuh sebenarnya, dimana tegangan sentuh sebenarnya meningkat menjadi $651,7 \text{ V}$ pada tahanan jenis tanah $100 \Omega\text{-m}$, $1303,3 \text{ V}$ pada tahanan jenis tanah $200 \Omega\text{-m}$ dan $3258,3 \text{ V}$ pada tahanan jenis tanah $500 \Omega\text{-m}$. Nilai tegangan sentuh pada resistivitas $200 \Omega\text{-m}$ sudah melebihi batas tegangan yang diizinkan untuk berat badan 50 kg , dimana batas tegangan sentuh untuk 50 kg adalah $1172,5 \text{ V}$. Nilai tegangan sentuh sebenarnya pada resistivitas $500 \Omega\text{-m}$ juga sudah melebihi batas tegangan sentuh yang diizinkan baik untuk berat badan 50 kg dan 70 kg . Hal ini menunjukkan adanya potensi bahaya serius, terutama pada jenis tanah dengan resistivitas tinggi seperti pasir kering.

Sementara itu, tegangan langkah yang sebenarnya masih berada di bawah batas yang diizinkan untuk semua variasi tanah, namun cenderung mendekati ambang batas pada resistivitas $500 \Omega\text{-m}$ ($1483,3 \text{ V}$ dari batas $2263,2 \text{ V}$ untuk 50 kg). Dari hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa jenis tanah sangat memengaruhi efektivitas sistem pentanahan. Tanah dengan resistivitas tinggi menyebabkan meningkatnya resistansi pentanahan, yang berdampak langsung terhadap peningkatan GPR, tegangan langkah, dan tegangan sentuh

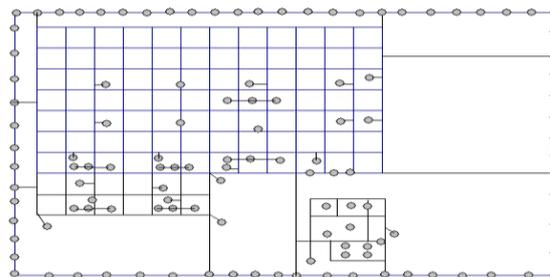
Simulasi Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 Kv Cendana Dengan Elemen Pagar

Pada bab ini, akan diuraikan pembahasan mengenai hasil simulasi yang telah disajikan pada sub bab ini. Salah satu temuan paling signifikan dari penelitian ini adalah pengaruh ganda yang bersifat kontradiktif dari penyambungan pagar gardu induk ke grid pentanahan utama. Di satu sisi, simulasi menunjukkan bahwa tindakan ini memberikan manfaat dengan menurunkan nilai *Ground Potential Rise* (GPR) secara keseluruhan, yang secara teoretis meningkatkan keamanan sistem secara keseluruhan. Namun di sisi lain, hal ini justru memperburuk kondisi keselamatan pada titik-titik lokal tertentu dengan meningkatkan secara drastis magnitudo tegangan sentuh dan tegangan langkah di sepanjang perimeter pagar.

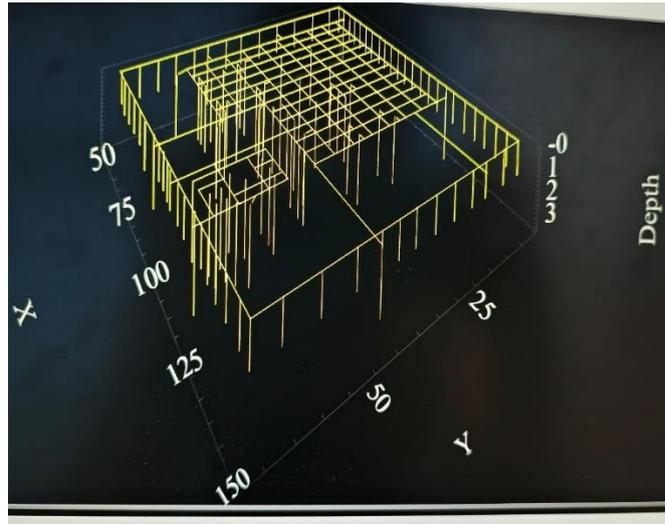
Untuk menjawab permasalahan ini, pembahasan berikut akan dibagi ke dalam beberapa bagian utama. Pertama, akan dianalisis pengaruh penyambungan pagar terhadap parameter sistem, yaitu resistansi grid (R_g) dan GPR. Kedua, analisis distribusi potensial di permukaan tanah untuk menjelaskan mengapa tegangan sentuh dan tegangan langkah justru meningkat di area perimeter, dengan penekanan khusus pada fenomena efek sudut (*corner effect*).

Untuk memahami hasil tersebut, penting untuk merinci bagaimana elemen pagar dimodelkan dan disimulasikan. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengevaluasi secara kuantitatif dampak dari penyambungan (*bonding*) pagar terhadap performa keselamatan sistem pentanahan saat terjadi gangguan tanah. Dalam perangkat lunak simulasi, pagar dimodelkan sebagai serangkaian konduktor vertikal (tiang pagar) yang saling terhubung oleh konduktor horizontal (kawat atau panel pagar). Model ini merepresentasikan struktur fisik pagar yang umumnya terbuat dari baja galvanis. Kedalaman penanaman tiang pagar dan material konduktor menjadi parameter penting dalam model ini.

Desain Pentanahan Gardu Induk 150 Kv Cendana Dengan Penambahan Elemen Pagar



Gambar 8 Desain pentanahan dengan penambahan elemen pagar

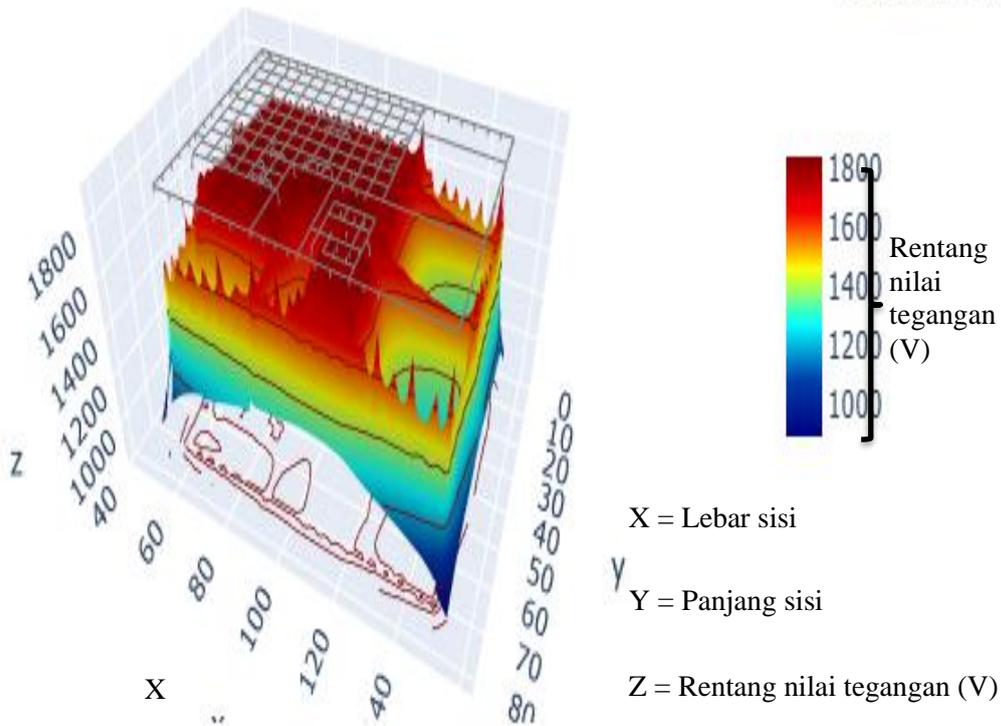


Hasil simulasi sistem pentanahan dengan penambahan elemen pagar

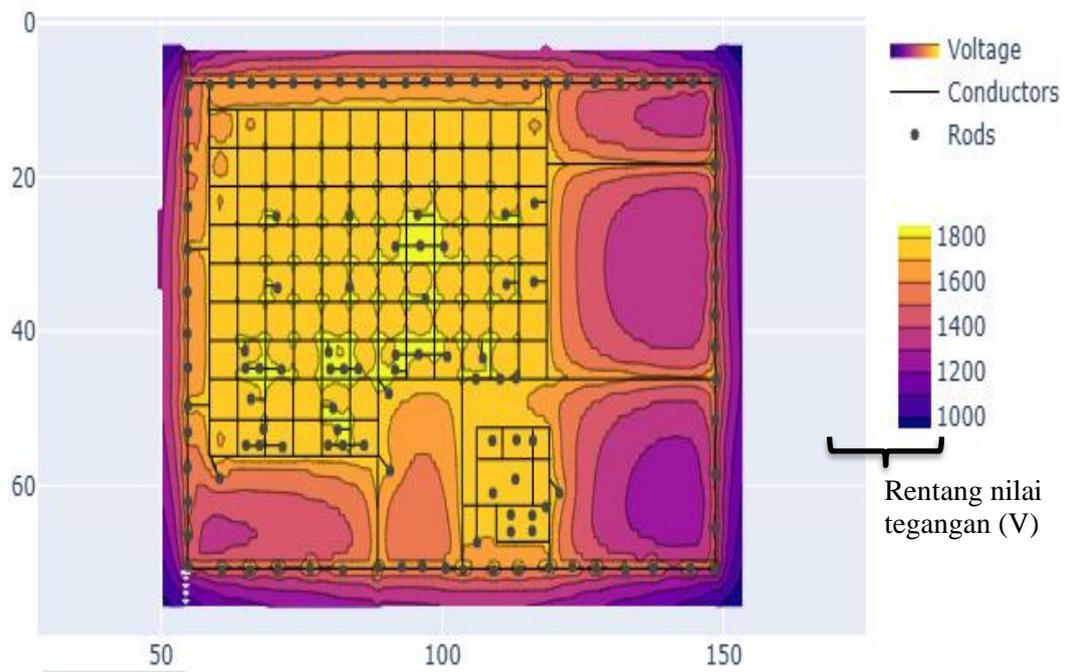
Tabel 6 Hasil simulasi sistem pentanahan dengan penambahan elemen pagar

No	Parameter	Hasil Simulasi
1	Resistansi Pentanahan (R_g)	0,607 Ω
2	Ground Potential Rise (GPR)	1839,7 V
3	Tegangan Langkah yang Diizinkan 50 kg	4197,8 V
4	Tegangan Langkah yang Diizinkan 70 kg	5681,6 V
5	Tegangan Sentuh yang Diizinkan 50 kg	1172,5 V
6	Tegangan Sentuh yang Diizinkan 70 kg	1586,9 V
7	Tegangan Langkah yang Sebenarnya	768 V
8	Tegangan Sentuh yang Sebenarnya	936,5 V

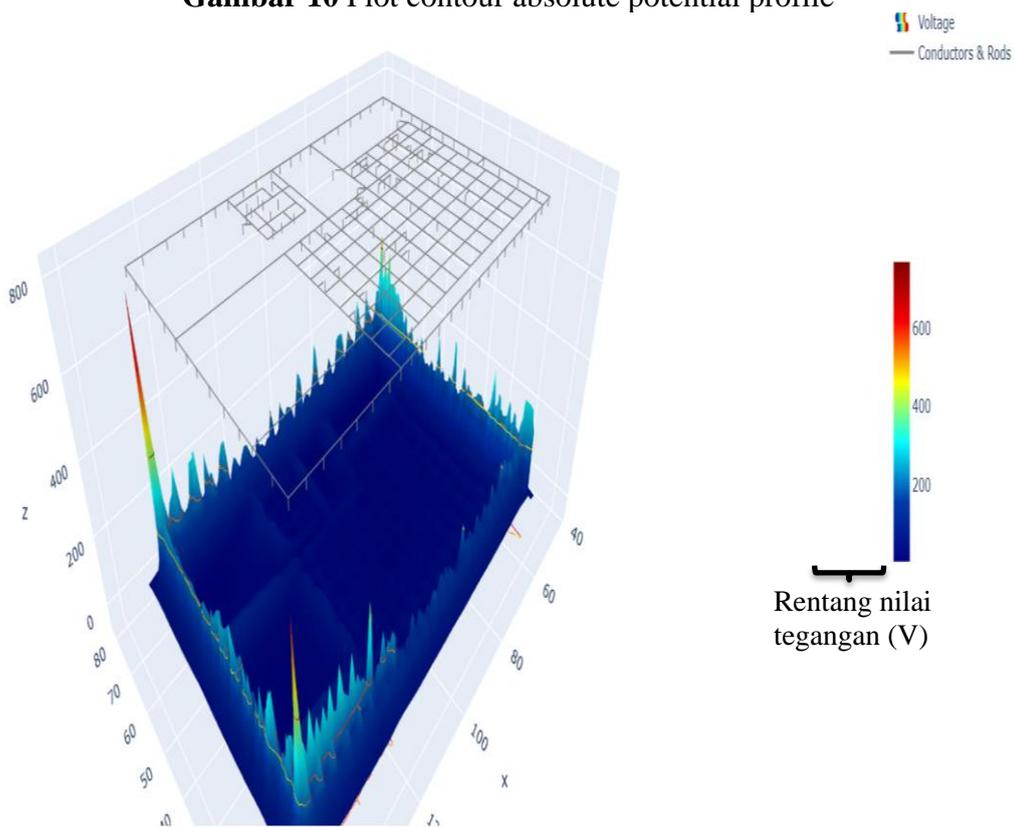
 Voltage
 Conductors & Rods



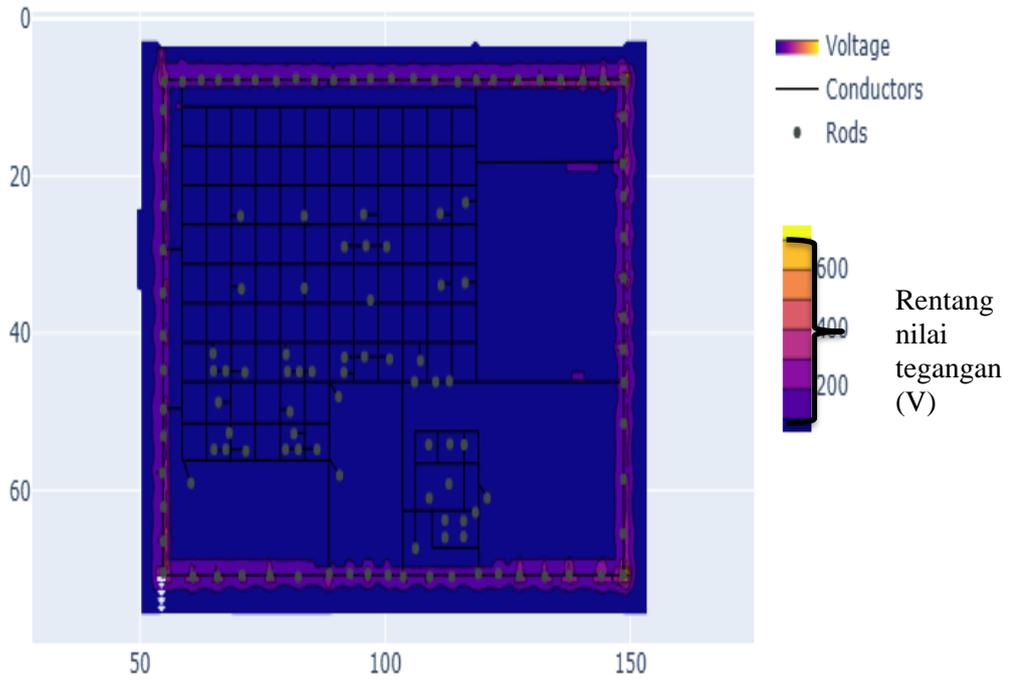
Gambar 9 Plot absolute potential profile



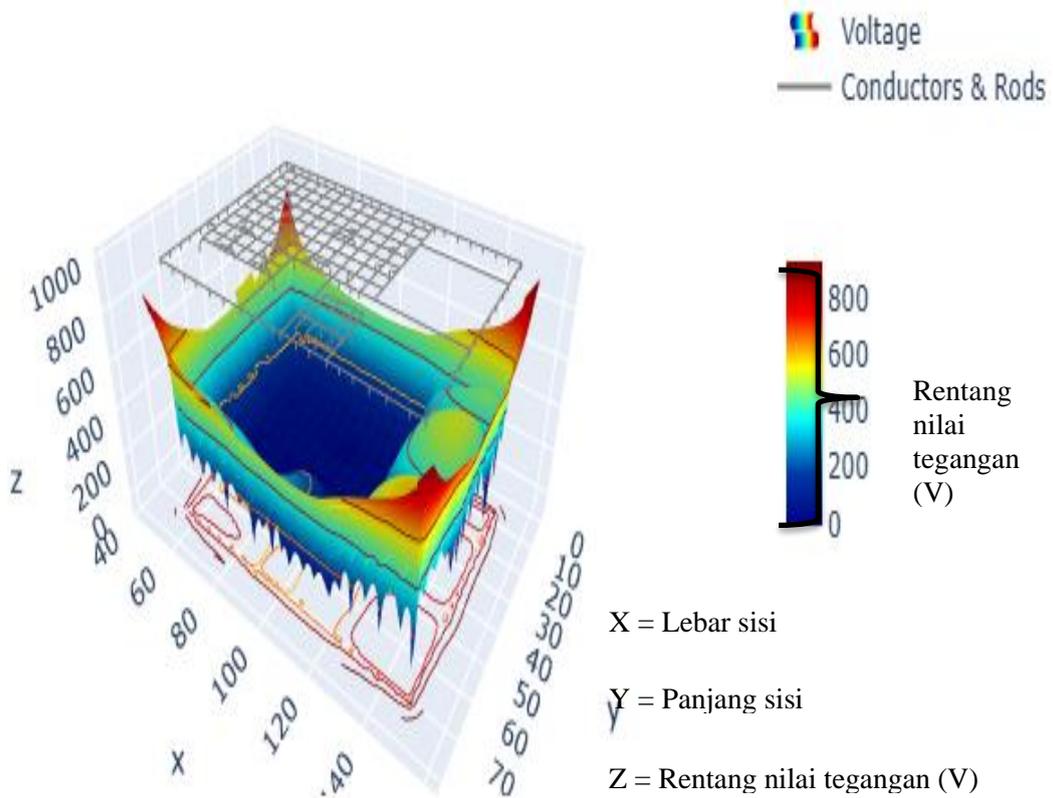
Gambar 10 Plot contour absolute potential profile



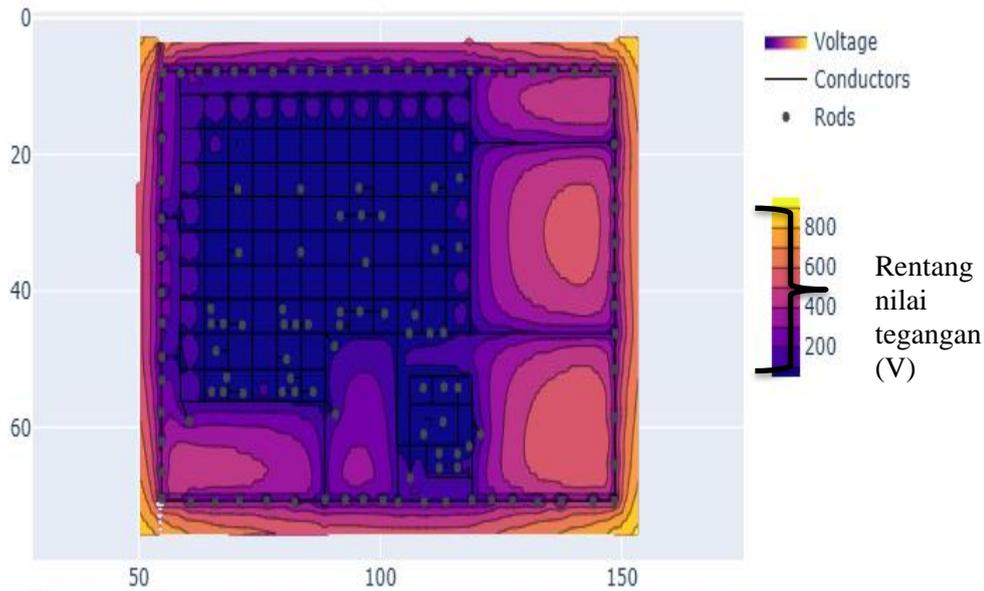
Gambar 11. Plot step potential profile



Gambar 12. Plot contour step potential profile



Gambar 13 Plot touch potential profile



Gambar 14 Plot contour touch potential profile

Sistem pentanahan yang diterapkan di gardu induk 150 kV Cendana adalah sistem pentanahan grid-rod, dengan panjang konduktor pentanahan sumbu x 60 meter dan panjang konduktor pentanahan sumbu y 45 meter. Total batang rod yang digunakan adalah 54 buah dengan panjang masing – masing batang rod adalah 3 meter. Grid pentanahan ditanam sedalam 0,5 m dari permukaan tanah dengan jenis tanah pada lokasi garu induk Cendana adalah tanah kuning. Diatas permukaan tanah terdapat batu pecah atau batu kerikil dengan ketebalan permukaan 20 cm yang berfungsi sebagai lapisan permukaan tanah. Batu pecah atau kerikil yang digunakan sebagai lapisan permukaan tanah pada gardu induk memiliki beberapa fungsi penting, terutama untuk keselamatan dan keandalan sistem pentanahan seperti mengurangi tegangan sentuh dan langkah. Batu pecah menciptakan lapisan isolasi antara tubuh manusia dan tanah asli, sehingga arus gangguan lebih kecil mengalir melalui tubuh bila terjadi gangguan sistem.

Berdasarkan hasil olah data lewat perhitungan dan simulasi yang sudah dilakukan di dapatlah beberapa temuan penting seperti resistansi pentanahan pada gardu induk Cendana yang cukup rendah. Nilai resistansi pentanahan hasil perhitungan adalah 0,85 Ω , hasil simulasi sebesar 0,79 Ω , dan nilai resistansi pentanahan hasil pengukuran adalah rata-rata 0,8. Hasil perhitungan dan simulasi menunjukkan hasil yang identik dengan hasil pengukuran nilai resistansi pentanahan di gardu induk 150 kV Cendana. Berdasarkan hasil tersebut, nilai resistansi pentanahan gardu induk 150 kV Cendana kurang memenuhi standar SPLN T5.012:2020 ($\leq 0,5 \Omega$), menunjukkan desain sistem pentanahan masih kurang dalam batas aman. Jika dibandingkan hasil perhitungan dan simulasi nilainya sangat mendekati dan hasil ini dapat divalidasi. Perhitungan manual menghasilkan GPR sebesar 2576 V, sedangkan simulasi menunjukkan GPR yang lebih rendah, yaitu 2391,4 V. Selisih ini menunjukkan bahwa model penghitungan manual, yang hanya mengalikan arus gangguan dengan resistansi pentanahan, cenderung memberikan estimasi GPR yang lebih tinggi. Sementara itu, simulasi 3D atau 2D yang lebih kompleks dapat memperhitungkan efek penyebaran arus dalam tanah, perbedaan lapisan konduktivitas, dan kemungkinan ground ring atau strap di sekitar lokasi, sehingga nilai GPR yang dihasilkan menjadi lebih realistis dan biasanya lebih rendah daripada prediksi linear sederhana. Dengan GPR yang lebih rendah, maka potensi bahaya tegangan langkah dan tegangan sentuh secara total ikut berkurang dalam simulasi.

Dari hasil perhitungan dan simulasi ditemukan bahwa tegangan langkah aktual atau

yang sebenarnya pada gardu induk 150 kV Cendana masih sangat jauh dibawah tegangan langkah yang diizinkan sehingga masih dalam batas aman baik untuk berat tubuh manusia 50 kg dan 70 kg. Hasil perhitungan dan simulasi tegangan langkah yang sebenarnya adalah 448,41 V dan 277,8 V. Kedua nilai ini yang dihasilkan melalui perhitungan dan simulasi memiliki perbedaan yang cukup jauh yaitu sekitar 170 V. Hal ini dapat dijelaskan dengan prinsip dasar simulasi yaitu menggambarkan kondisi aktual dilapangan dengan mempertimbangkan desain pentanahan, dimana software simulasi mempertimbangkan penyebaran arus yang merata ditanah dan memvisualisasikan nilai – nilai parameter dalam sistem pentanahan adalah ideal. Kemudian alasan ada perbedaan nilai tegangan langkah yang dihasilkan adalah karena perhitungan menggunakan metode IEEE sedangkan untuk simulasi menggunakan metode Finite Elemen Methode (FEM) atau Elemen Hingga, sehingga memang menghasilkan nilai yang berbeda. Namun untuk nilai batas tegangan langkah yang diizinkan baik perhitungan maupun simulasi menunjukkan hasil yang sama.

Sementara untuk tegangan sentuh sebenarnya pada gardu induk 150 kV Cendana untuk berat badan 50 kg dan 70 kg tegangan sentuh masih dalam batas aman atau dalam batas yang diizinkan. Jika melihat nilai tegangan sentuh, perhitungan manual memperoleh tegangan sentuh yang diizinkan 1172,50 V untuk 50 kg dan 1586,91 V untuk 70 kg, sedangkan simulasi menunjukkan nilai yang sama yaitu 1172,5 V dan 1586,9 V. Kedua hasil ini baik perhitungan dan simulasi menunjukkan nilai yang sama yang menunjukkan keakuratan hasil dari simulasi yang bisa divalidasi dengan hasil perhitungan.

Dari sudut keselamatan dan keandalan sistem pentanahan pada gardu induk 150 kV Cendana, baik perhitungan manual maupun simulasi memperoleh kesimpulan yang sama yaitu resistansi pentanahan masih kurang dalam batas aman yang diizinkan sesuai standar SPLN T5.012:2020, tegangan langkah dan tegangan sentuh yang sebenarnya sudah jauh di bawah batas aman.

Selanjutnya, dilakukan juga simulasi pada sistem pentanahan gardu induk 150 kV Cendana dengan memvariasikan arus gangguan dan jenis tanah atau tahanan jenis rata-rata tanah sesuai dengan perumusan masalah awal. Simulasi atau percobaan dengan variasi ini dilakukan untuk mengetahui apakah desain sistem pentanahan pada gardu induk Cendana masih dalam kategori aman dan andal apabila dalam beberapa dekade kedepan beban pada gardu induk tersebut semakin meningkat dan arus gangguan pada gardu induk Cendana semakin meningkat seiring waktu. Kemudian untuk mengetahui pengaruh dari penerapan jenis tanah yang berbeda terhadap keandalan sistem pentanahan gardu induk Cendana.

Setelah dilakukan simulasi dengan memvariasikan arus gangguan dinaikkan menjadi 5 kA, 5,5 kA dan 6 kA hasil simulasi memperlihatkan bahwa perubahan arus gangguan dari 4,9 kA menjadi 5 kA, 5,5 kA dan 6 kA tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap resistansi pentanahan, dimana nilai R nya masih sama disetiap arus gangguan yaitu 0,734 Ω . Untuk ground potential rise pada simulasi memperlihatkan perbedaan yang signifikan dikarenakan arus gangguan yang dinaikkan sehingga GPR nya kemudian semakin tinggi mengikuti arus gangguan yang semakin tinggi juga yaitu 2270,1 V, 2497,1 V dan 2724,1 V. Untuk tegangan langkah dan tegangan sentuh yang diizinkan baik untuk berat badan 50 kg dan 70 kg peningkatan arus gangguan tidak mempengaruhi hasil dimana nilainya masih tetap sama. Hasil analisis memperoleh bahwa untuk arus gangguan 5 kA, 5,5 kA dan 6 kA sistem pentanahan ini masih aman untuk parameter resistansi pentanahan, tegangan langkah untuk berat badan 50 kg dan 70 kg, dan tegangan sentuh juga masih dalam batas aman untuk arus gangguan sebesar 5 kA dan 5,5 kA. Akan tetapi untuk arus gangguan sebesar 6 kA tegangan sentuh untuk berat badan 50 kg sistem pentanahan ini kurang baik, karena nilai tegangan sentuhnya melebihi batas yang diizinkan.

Berdasarkan hasil simulasi pengaruh jenis tanah dengan resistivitas berbeda, yaitu tanah lembap ($100 \Omega\text{-m}$), pasir basah ($200 \Omega\text{-m}$), dan kerikil basah ($500 \Omega\text{-m}$), terlihat adanya pengaruh signifikan resistivitas tanah terhadap performa sistem pentanahan. Pada tanah lembap yang memiliki resistivitas paling rendah ($100 \Omega\text{-m}$), sistem pentanahan menunjukkan hasil terbaik dengan resistansi pentanahan sebesar $0,815 \Omega$ dan Ground Potential Rise (GPR) sebesar $2522,3 \text{ V}$. Nilai tegangan langkah dan tegangan sentuh pada kondisi ini masih berada di bawah batas maksimum yang diizinkan sehingga dianggap aman bagi keselamatan manusia. Ketika resistivitas tanah meningkat menjadi $200 \Omega\text{-m}$ dan $500 \Omega\text{-m}$, performa sistem pentanahan menurun drastis. Nilai resistansi pentanahan meningkat masing-masing menjadi $1,684 \Omega$ dan $4,209 \Omega$, yang berdampak langsung terhadap kenaikan GPR hingga mencapai $12611,5 \text{ V}$. Menurut standar SPLN T5.012:2020, batas tahanan pentanahan yang disarankan adalah $\leq 0,5 \text{ Ohm}$ untuk semua level tegangan. Dampak yang paling mengkhawatirkan dari meningkatnya resistivitas tanah terlihat pada tegangan sentuh yang sebenarnya, yaitu sebesar $1303,3 \text{ V}$ pada $200 \Omega\text{-m}$ dan $3258,3 \text{ V}$ pada $500 \Omega\text{-m}$. Nilai ini jauh melebihi batas tegangan sentuh yang diizinkan baik untuk berat badan manusia 50 kg dan 70 kg . Kondisi ini sangat berbahaya dan menunjukkan bahwa sistem pentanahan tidak lagi mampu melindungi manusia dari risiko sengatan listrik pada saat gangguan terjadi. Sementara itu, tegangan langkah yang sebenarnya pada semua jenis tanah masih berada dalam batas aman, walaupun nilainya meningkat seiring kenaikan resistivitas jenis tanah.

Terakhir dilakukan juga simulasi sistem pentanahan dengan penambahan elemen pagar. Sebelum menjalankan simulasi, pada study case diatur untuk boundary extension atau perluasan batas menjadi 5 meter . Hal ini dilakukan untuk tujuan simulasi dengan elemen pagar untuk memperluas area perhitungan dan visualisasi di luar batas fisik terluar (pagar) dari grid pentanahan yang sudah di desain sehingga dapat menganalisis skenario bahaya yang paling kritis yaitu tegangan sentuh dan langkah di area luar perimeter pagar. Analisis hasil simulasi antara skenario tanpa pagar dan dengan pagar terhubung menunjukkan sebuah manfaat yang jelas dan sesuai dengan teori dasar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penyambungan pagar galvanis yang luas ke grid utama secara signifikan menurunkan nilai resistansi total sistem pentanahan (R_g). Hasil simulasi menunjukkan nilai R_g turun dari $0,79 \Omega$ menjadi $0,607 \Omega$.

Penurunan ini terjadi karena pagar bertindak sebagai konduktor tambahan yang berjalan secara paralel dengan grid utama. Hal ini secara efektif memperluas total cakupan area sistem pentanahan dan menyediakan lebih banyak jalur bagi arus gangguan untuk disalurkan ke dalam tanah. Sesuai dengan hubungan fundamental $GPR = I_g \times R_g$, penurunan nilai R_g ini secara langsung menyebabkan penurunan pada nilai GPR total sistem. Nilai GPR tercatat turun dari $2391,4 \text{ Volt}$ menjadi $1839,7 \text{ Volt}$. Dari perspektif ini, tindakan penyambungan pagar merupakan sebuah langkah yang positif karena berhasil menurunkan tingkat bahaya di seluruh gardu induk.

Meskipun GPR total menurun, analisis lebih mendalam pada distribusi potensial permukaan tanah menunjukkan konsekuensi yang justru meningkatkan bahaya lokal, terutama di area perimeter luar pagar. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui konsep gradien potensial yang curam. Tanpa pagar, GPR yang lebih tinggi terdistribusi secara lebih landai dan menyebar. Namun, ketika pagar yang konduktif dihubungkan, ia menjadi batas terluar dari sistem yang bertegangan tinggi. Hal ini menciptakan sebuah "tebing potensial" (potential cliff), di mana seluruh potensial yang ada pada pagar harus turun menjadi nol dalam jarak yang sangat pendek tepat di luar garis pagar.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisa yang sudah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Ukuran luas penampang elektroda yang digunakan pada sistem pentanahan gardu induk 150 kV Cendana sudah sesuai dengan standar ketentuan dari IEEE Std 80-2013 (Guide for Safety in AC Substation Grounding) dengan luas penampang yang digunakan adalah 150 [mm]^2 .
2. Dari hasil perhitungan, pengukuran dan simulasi sistem pentanahan pada gardu induk 150 kV Cendana nilai resistansi pentanahan masih kurang dari batas yang diizinkan. Nilai resistansi pentanahan berdasarkan pengukuran di lapangan diperoleh dengan nilai rata-rata $0,8 \Omega$, sementara standar SPLN T5.012:2020 menyatakan batas resistansi pentanahan adalah $\leq 0,5 \Omega$.
3. Nilai tegangan langkah yang sebenarnya pada gardu induk 150 kV Cendana baik untuk berat badan 50 kg dan 70 kg sudah dalam batas aman yang diizinkan, dimana nilai tegangan langkah sebenarnya berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi adalah 448,41 V dan 277,8 V, sedangkan tegangan langkah yang diizinkan adalah 4197,8 V untuk berat badan 50 kg dan 5681,6 V untuk berat badan 70 kg.
4. Tegangan sentuh pada gardu induk 150 kV Cendana menunjukkan hasil yang baik dan dalam batas aman yang diizinkan. Tegangan sentuh sebenarnya berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi adalah 484 V dan 584,7 V, sementara tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat badan 50 kg adalah 1172,5 V dan untuk berat badan 70 kg adalah 1586,9 V.
5. Berdasarkan hasil simulasi dengan memvariasikan besar arus gangguan yaitu 5 kV, 5,5 kV, dan 6 kV nilai tahanan pentanahan pada gardu induk 150 kV Cendana adalah $0,79 \Omega$ dan masih kurang dalam batas aman. Peningkatan arus gangguan juga sangat berpengaruh terhadap nilai GPR, dimana semakin tinggi arus gangguan semakin tinggi pula nilai GPR. Untuk tegangan langkah dan tegangan sentuh pada arus gangguan 5 kV – 6 kV masih dalam batas aman yang diizinkan.
6. Berdasarkan hasil simulasi dengan memvariasikan besar tahanan jenis rata-rata tanah yaitu $100 \Omega\text{-m}$, $200 \Omega\text{-m}$ dan $500 \Omega\text{-m}$ sangat berpengaruh terhadap nilai GPR, dimana semakin tinggi tahanan jenis rata-rata tanah semakin tinggi pula nilai GPR yang dihasilkan. Untuk tahanan jenis rata-rata tanah yaitu $100 \Omega\text{-m}$ sama dengan kesimpulan poin 5 yaitu nilai tahanan pentanahan pada gardu induk 150 kV Cendana masih kurang dalam batas aman yaitu sekitar $0,8 \Omega$, untuk tegangan langkah juga masih dalam batas aman yang diizinkan, sementara untuk tegangan sentuh pada kondisi tahanan jenis rata-rata tanah yaitu $100 \Omega\text{-m}$ masih dalam batas yang diizinkan. Untuk tahanan jenis rata-rata tanah $200 \Omega\text{-m}$ dan $500 \Omega\text{-m}$, desain sistem pentanahan gardu induk 150 kV Cendana sudah tidak aman dan tidak dapat diterapkan untuk tahanan jenis rata-rata tanah $200 \Omega\text{-m}$ dan $500 \Omega\text{-m}$.

Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian ini maupun untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Dari hasil perhitungan, pengukuran dan simulasi sistem pentanahan pada gardu induk 150 kV Cendana nilai resistansi pentanahan masih kurang dari batas yang diizinkan. Untuk menurunkan nilai resistansi pentanahan agar memenuhi standar SPLN T5.012:2020, langkah yang dapat diambil adalah dengan menambahkan konduktor rod pentanahan atau menurunkan resistivitas tanah.
2. Untuk menjawab permasalahan pada kasus sistem pentanahan dengan penambahan

elemen pagar yang sudah dibahas pada bab iv, penulis memberikan saran yaitu dengan menambah luas grid pentanahan sehingga pagar masuk dalam bagian grid utama pagar dan hal ini sesuai dengan standar keamanan yang diberikan oleh IEEE Std 80-2000.

3. Untuk pengembangan penelitian ini, kiranya dapat dilakukan analisa serta simulasi sistem pentanahan dengan memvariasikan desain bentuk grid seperti bentuk grid T, bentuk grid L atau bentuk grid segitiga.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Indonesia. (2000). Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000). Jakarta: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan.
- Ezkhelenergy. (2013, November). Pentanahan Grid. Diakses pada 17 Juli 2025, dari <https://ezkhelenergy.blogspot.com/2013/11/pentanahan-grid.html>
- Fitriani, A., Syafriwel, S., Hidayat, J., Panjaitan, J., & Syahputra, S. A. (2023). Analisis Pentanahan Gardu Induk Akibat Surja Petir Menggunakan Finite Elemen Method. *Jambura Journal of Electrical and Electronic Engineering*.
- Fitriani, A., Panjaitan, J., & Syahputra, S. A. (2021). The Effect of Soil Type on Touch Voltage and Step Voltage in the Grid Grounding System. *ELKHA: Jurnal Teknik Elektro*, 16(1), 56-62.
- Gil, G. H., Kim, H., & Kil, G. (2010). Study of Touch and Step Voltages with Grounding Grid Using Electrolytic Tank and Analysis Program. *International Journal of Safety*, 9, 1-5.
- Hardi, S., Andira, R., Nisja, I., Octrialdi, B., & Pinem, M. (2021). Economic Design of Substation Grounding Grid using ETAP Software: A Case Study of 2 x 500 MVA Galang Substation. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Hutauruk, T. S. (1999). Pengetanahan Netral Sistem Pengaman Tenaga & Pengetanahan Peralatan. Jakarta: Erlangga.
- IEEE Std 80-2000. (2000). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- Jang, U.-Y., Cha, H.-K., Cha, S.-W., Park, D.-W., & Kil, G.-S. (2011). Design and Application of a Ground Risk Voltage Measurement System. *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*.
- Gil, H. J., Kim, H. K., & Kill, G. S. (2010). Study of touch and step voltages with grounding grid using electrolytic tank and analysis program. *International Journal of Safety*, 9(2), 1-5.
- Pamudji, N. (2014). Keputusan Direksi PT PLN (Persero) Nomor 0520-2.K/DIR/2014.
- Perng, J. W., Kuo, Y. C., & Lu, S. P. (2018). Grounding system cost analysis using optimization algorithms. *Energies*.
- SPLN T5.012. (2020). Pembedaan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi.
- Sumardjati, P., Yahya, S., & Mashar, A. (2008). Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid III. Jakarta: Erlangga.