

ANALISA SISTEM PENTANAHAN DENGAN KOMBINASI GRID & ROD PADA GARDU INDUK 150 KV SEI RAYA

Chandra Saputra Wijaya¹, Managam Rajagukguk², Danial³

chandrasaptrawijaya79@student.untan.ac.id¹, managam.rajagukguk@ee.untan.ac.id²,
danial.noah@ee.untan.ac.id³

Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pentanahan menggunakan kombinasi elektroda grid dan rod pada Gardu Induk 150 kV Sei Raya. Metode penelitian meliputi pengumpulan data lapangan, pengukuran tahanan pentanahan, serta simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) untuk memodelkan kondisi tanah dan konfigurasi elektroda. Luas area pentanahan yang dianalisis adalah $102 \text{ m} \times 50 \text{ m}$. Hasil simulasi menunjukkan resistansi pentanahan total sebesar $0,355 \Omega$ pada kondisi tanah homogen, sedangkan pengukuran lapangan menghasilkan rata-rata tahanan pentanahan sekitar $0,7 \Omega$. Pada kondisi tanah liat lembab dengan resistivitas rata-rata $100 \Omega \cdot \text{m}$, simulasi dan pengukuran memvalidasi nilai optimal sekitar $0,3 \Omega$. Jika dibandingkan dengan standar, nilai rata-rata lapangan ($0,7 \Omega$) melewati batas SPLN T5.012:2020 ($\leq 0,5 \Omega$), namun masih memenuhi rekomendasi IEEE Std 80-2013 ($\leq 1 \Omega$). Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi grid-rod efektif menurunkan tahanan pentanahan, tetapi perlu optimasi seperti penambahan rod atau penyesuaian geometri grid untuk memastikan kepatuhan penuh terhadap SPLN pada kondisi lapangan kering. Rekomendasi perbaikan dan pemeliharaan berkala juga diajukan.

Kata Kunci: Pentanahan, Grid-Rod, Tahanan Pentanahan, ETAP, Gardu Induk.

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur vital yang berperan besar dalam menunjang aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat. Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah gardu induk, yang berfungsi sebagai titik transformasi dan distribusi tenaga listrik dari tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah sebelum didistribusikan ke konsumen. Pada gardu induk dengan tegangan tinggi seperti 150 kV, sistem pentanahan memegang peran sangat penting dalam menjamin keselamatan peralatan, personel, serta keandalan sistem secara keseluruhan.

Seiring meningkatnya kebutuhan akan keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik, analisis terhadap sistem pentanahan di gardu induk 150 kV menjadi sangat penting. Analisis ini meliputi evaluasi terhadap resistansi tanah, desain jaringan konduktor pentanahan, serta simulasi tegangan selama kondisi gangguan. Dengan melakukan analisis yang cermat, sistem pentanahan dapat dioptimalkan agar memenuhi standar keselamatan seperti yang ditetapkan dalam IEEE Std 80-2013 maupun SPLN dari PLN.

PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Pontianak memegang peranan vital dalam mengatur dan mengawasi pendistribusian energi listrik di wilayah Kalimantan Barat. Salah satu gardu induk yang berada di bawah pengelolaannya adalah Gardu Induk 150 kV Sei Raya, yang berlokasi di Jl. Adi Sucipto, Kabupaten Kubu Raya. Gardu Induk ini merupakan titik sentral dalam memastikan keandalan pasokan listrik bagi masyarakat dan industri di sekitarnya. Keandalan sebuah gardu induk sangat bergantung pada efektivitas sistem proteksinya, di mana sistem pentanahan menjadi fondasi utamanya.

Sistem pentanahan yang dirancang dengan baik berfungsi untuk melindungi peralatan dari kerusakan akibat tegangan lebih, menyalurkan arus gangguan ke tanah, dan yang

terpenting menjamin keselamatan manusia dari bahaya tegangan yang timbul saat terjadi gangguan. Seiring dengan meningkatnya beban dan perkembangan sistem kelistrikan, arus gangguan cenderung mengalami peningkatan dari waktu ke waktu. Fenomena ini menjadi perhatian serius di Gardu Induk 150 kV Sei Raya. Berdasarkan data historis, tercatat pernah terjadi gangguan satu fasa ke tanah (single line-to-ground fault) pada tahun 2016 dengan arus gangguan mencapai 3.7 kA. Arus gangguan yang semakin besar menuntut evaluasi ulang terhadap kondisi sistem pentanahan eksisting untuk memastikan nilainya masih berada di bawah batas standar yang ditetapkan oleh PT. PLN (Persero).

Salah satu gangguan yang paling sering terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan satu fasa ke tanah (single line-to-ground fault). Gangguan ini dapat menyebabkan arus gangguan yang besar mengalir ke sistem pentanahan, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan peralatan dan membahayakan keselamatan manusia. Terjadinya arus gangguan fasa ke tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor. Umumnya, gangguan ini diawali oleh menurunnya kualitas atau kegagalan isolasi pada peralatan maupun konduktor jaringan, baik akibat penuaan, kelembapan, polusi, maupun kerusakan mekanis. Selain itu, sambaran petir pada saluran transmisi atau struktur gardu induk juga dapat menimbulkan loncatan listrik ke tanah sehingga memicu terjadinya gangguan.

Faktor eksternal seperti pohon atau vegetasi yang menyentuh konduktor, hewan yang masuk ke peralatan, dan benda asing yang jatuh ke instalasi dapat pula menjadi penyebab arus fasa mengalir ke tanah. Kondisi cuaca ekstrem, seperti hujan lebat dan kelembapan tinggi, sering memperburuk keadaan dengan meningkatkan konduktivitas permukaan isolator hingga terjadi flashover. Tidak hanya itu, kegagalan peralatan seperti isolator pecah, sambungan kabel longgar, arrester yang rusak, maupun gangguan mekanis seperti tiang tumbang dan konduktor putus juga berkontribusi terhadap munculnya gangguan ke tanah.

Seiring bertambahnya usia infrastruktur kelistrikan, risiko terjadinya gangguan fasa ke tanah semakin meningkat karena adanya degradasi isolasi dan korosi pada sambungan. Kondisi sistem pentanahan yang kurang baik turut memperbesar dampak gangguan karena arus yang seharusnya mengalir ke tanah mungkin tidak tersalurkan secara efektif. Berbagai faktor tersebut menunjukkan bahwa gangguan satu fasa ke tanah merupakan ancaman nyata bagi keandalan sistem tenaga listrik, sehingga evaluasi terhadap sistem pentanahan menjadi sangat penting, terutama pada gardu induk yang memiliki level tegangan tinggi seperti Gardu Induk 150 kV Sei Raya.

Oleh karena itu, penulis merasa penting untuk melakukan penelitian mendalam mengenai kelayakan sistem pentanahan di lokasi tersebut. Penelitian yang berjudul “Analisa Sistem Pentanahan Dengan Kombinasi Grid & Rod Pada Gardu Induk 150 kV Sei Raya” ini akan menganalisis secara teknis apakah konfigurasi pentanahan yang ada saat ini masih memenuhi standar keamanan dan operasional PLN, terutama dalam menghadapi potensi arus gangguan yang terus meningkat.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi teknis dan simulasi. Tujuannya adalah untuk menganalisis sistem pentanahan pada Gardu Induk 150kV Sei Raya dengan menggunakan metode kombinasi grid dan rod. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran numerik terhadap kinerja sistem pentanahan, termasuk nilai tahanan tanah. Melalui pemodelan teknis dan simulasi berbasis perangkat lunak, data yang diperoleh dapat dianalisis secara sistematis dan dibandingkan dengan standar internasional yang berlaku, khususnya IEEE Std 80-2013.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Luas Grid Pentanahan

Luas keseluruhan area pentanahan gardu induk 150 kV Sei Raya dihitung menggunakan nilai panjang dan lebar grid pentanahan pada gardu induk tersebut. Adapun ukuran grid pentanahan pada gardu induk 150 kV Sei Raya adalah:

Panjang (P) : 102 meter

Lebar (L) : 50 meter

Luas area pentanahan gardu induk 150 kV Sei Raya adalah:

$$A = P \times L$$

$$A = 102 \text{ m} \times 50 \text{ m}$$

$$A = 5100 \text{ m}^2$$

Jadi, luas area pentanahan gardu induk 150 kV Sei Raya adalah 5100 m^2 .

Tahanan Jenis Tanah

Jenis tanah pada lapisan pertama area gardu induk 150 kV Sei Raya adalah tanah kuning atau tanah liat dengan nilai resistivitas atau tahanan jenisnya berdasarkan PUIL, 2000:80 adalah $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Pada lapisan permukaannya digunakan hamparan kerikil dengan material granit yang melalui proses pencucian (*washed granite*) dengan nilai resistivitas atau tahanan jenisnya berdasarkan SPLN T5.012, “Pantanahan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi,” no. 0053, 2020 $\rho_s = 5000 \Omega\text{m}$. Sedangkan untuk lapisan kedua setelah tanah kuning atau tanah liat adalah jenis tanah rawa atau gambut (*wet organic soil*) dengan nilai tahanan jenis rata-rata berdasarkan PUIL, 2000:80 sebesar $30 \Omega\text{m}$.

Ukuran Minimum Elektroda Pentanahan

Untuk menghitung ukuran diameter minimum konduktor atau elektroda rod pentanahan dapat menggunakan persamaan 3.9 dengan memasukan nilai nilai parameter $I_g = 5000 \text{ A}$, $t = 0.5 \text{ s}$ dan $T_a = 35^\circ\text{C}$ yang diperoleh dari data gangguan pada gardu induk 150 kV Sei Raya serta $T_m = 1083^\circ\text{C}$ yang diperoleh dari tabel jenis konduktor dan nilai tahanan konduktor (*IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE Std. 80-2013. USA. 2013)

Maka, diperoleh :

$$A = I_g \sqrt{\frac{33t}{\log_{10}\left(\frac{T_m-T_a}{234+T_a}+1\right)}}$$
$$A = 5000 \text{ A} \sqrt{\frac{33 \times 0.5 \text{ s}}{\log_{10}\left(\frac{1083^\circ\text{C}-35^\circ\text{C}}{234+35^\circ}+1\right)}}$$

$$A = 5000 \text{ A} \sqrt{\frac{16.5}{\log_{10}\left(\frac{1048^\circ\text{C}}{269}+1\right)}}$$

$$A = 5000 \text{ A} \sqrt{\frac{16.5}{\log_{10}(3.89+1)}}$$

$$A = 5000 \text{ A} \sqrt{\frac{16.5}{0.69}}$$

$$A = 5000 \text{ A} \times 4.89$$

$$A = 24453.43 \text{ Circular mil}$$

$$\begin{aligned}
A &= \frac{24453.43}{1973} \text{ mm}^2 \\
A &= 12.39 \text{ mm}^2 \\
A &= \frac{\pi d^2}{4} \\
4A &= \pi d^2 \\
4 \times 12.39 \text{ mm}^2 &= \pi d^2 \\
49.56 \text{ mm}^2 &= \pi d^2 \\
d^2 &= \frac{49.56 \text{ mm}^2}{\pi} \\
d^2 &= 15.77 \text{ mm}^2 \\
d &= 4 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Jadi, diameter minimum konduktor grid dan rod pentanahan adalah 4 mm dengan arus gangguan sebesar 5 kA. Sistem pentanahan dirancang dengan mempertimbangkan pertumbuhan dan perkembangan beban serta arus gangguan. Diperoleh dari data sistem pentanahan pada gardu induk 150 kV Sei Raya dan sesuai dengan Tabel 3.1 Data Sistem Pentanahan Gardu Induk 150kV Sei Raya, untuk data ukuran diameter konduktor grid dan rod pentanahan yang digunakan adalah 16 mm (sesuai dengan aturan IEEE *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE Std. 80-2013. USA. 2013 dan SPLN T5.012, “Pantanahan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi,” no. 0053, 2020, minimal 15 mm), pemilihan ukuran 16 mm diameter ini dimaksud guna untuk keandalan sistem pentanahan untuk jangka waktu kedepan, di mana beban dan arus gangguan akan semakin bertambah. Dengan besar arus gangguan sekarang yaitu 5 kA, konduktor pada sistem pentanahan masih dapat menyalurkan arus gangguan dengan baik, dikarenakan ukuran konduktor minimum dengan arus gangguan sebesar 5 kA adalah 4mm, jadi ukuran diameter konduktor pada gardu induk 150 kV Sei Raya masih sangat aman untuk menyalurkan arus gangguan ke tanah.

Panjang Konduktor Pentanahan (Grid)

Sesuai dengan standar yang diberikan oleh SPLN T5.012, “Pantanahan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi,” no. 0053, 2020, jarak antara konduktor paralel (kisi-kisi) sebesar $D = 5$ meter. Dengan ukuran grid pentanahan pada gardu induk 150 kV Sei Raya sebesar 102 meter x 50 meter, maka untuk menghitung jumlah konduktor paralel (grid) yang dibutuhkan adalah sebagai berikut.

$$n_{AB} = n_x = \frac{50 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 10 \text{ Batang konduktor}$$

$$n_{AC} = n_{xy} = \frac{102 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 20 \text{ Batang konduktor}$$

Maka, total panjang konduktor grid adalah,

$$L_G = (10 \times 102 \text{ m}) + (20 \times 50 \text{ m})$$

$$L_G = 2020 \text{ meter}$$

Panjang Konduktor Pentanahan (Rod)

Sesuai dengan standar yang diberikan oleh IEEE *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE Std. 80-2013. USA. 2013 dan SPLN T5.012, “Pantanahan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi,” no. 0053, 2020, panjang minimum konduktor rod yang digunakan pada sistem pentanahan gardu induk adalah minimal 3 meter. Pada gardu induk 150 kV Sei Raya, panjang konduktor rod yang digunakan adalah 4 meter sebanyak 150 batang. Maka total panjang konduktor rod yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$L_R = \text{Jumlah rod} \times \text{Panjang rod}$$

$$L_R = 150 \times 4 \text{ meter}$$

$$L_R = 600 \text{ meter}$$

Panjang Total Konduktor Pentanahan Grid – Rod

Untuk menghitung panjang total konduktor pentanahan grid – rod pada gardu induk 150 kV Sei Raya diperlukan nilai L_G dan L_R . Pada perhitungan 4.4 panjang konduktor pentanahan (grid) diperoleh $L_G = 2020$ meter dan pada perhitungan 4.5 panjang konduktor pentanahan (rod) diperoleh $L_R = 600$ meter. Maka,

$$L_T = L_G + L_R$$

$$L_T = 2020 \text{ m} + 600 \text{ m}$$

$$L_T = 2620 \text{ meter}$$

Tahanan Pentanahan

Sebelum melakukan perhitungan tahanan pentanahan untuk sistem grid dan kombinasi grid-rod, penting untuk memahami landasan teoretis di balik formula yang digunakan. Standar yang menjadi acuan utama saat ini, IEEE Std 80, sejatinya merupakan pengembangan dari penelitian-penelitian awal yang dirintis oleh para ilmuwan seperti P.G. Laurent (1951) dan J. Nieman (1952). Laurent dan Nieman memperkenalkan formula-formula untuk menghitung tahanan pentanahan yang pada dasarnya mengaitkan nilai tahanan dengan dua parameter kunci: luas area yang dicakup oleh sistem pentanahan dan resistivitas tanah. Menyadari kebutuhan akan metode yang lebih akurat dan dapat diaplikasikan pada desain yang lebih kompleks, IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) mengembangkan formula-formula dalam standar IEEE Std 80 seperti pada persamaan 3.7. Standar ini mengambil konsep dasar dari Laurent dan Nieman, namun mengembangkannya menjadi persamaan yang lebih rinci dan akurat.

Rumus ini dapat digunakan untuk menghitung baik tahanan dari grid saja (R_{grid}) maupun tahanan total dari sistem kombinasi grid dan batang pentanahan (R_{total} atau $R_{grid-rod}$). Kunci dari fleksibilitas ini terletak pada parameter L_T (total panjang konduktor).

- Untuk menghitung R_{grid} (Tahanan Grid Saja): Nilai L_T yang dimasukkan ke dalam rumus adalah hanya total panjang konduktor horizontal yang membentuk grid pentanahan. Dalam hal ini, kontribusi dari batang pentanahan vertikal diabaikan.
- Untuk menghitung R_{total} (Tahanan Total Grid dan Rod): Nilai L_T yang digunakan adalah penjumlahan dari total panjang konduktor grid horizontal ditambah dengan total panjang semua batang pentanahan (rod) yang terpasang. Secara matematis: $L_T = L_G + L_R$ Di mana L_G adalah total panjang konduktor grid dan L_R adalah total panjang seluruh rod.

Tahanan Pentanahan Total (Kombinasi Grid – Rod)

Untuk menghitung tahanan pentanahan total sistem grid - rod adalah dengan langkah – langkah berikut ini.

$$A = 5100 \text{ m}^2 \text{ (diperoleh dari perhitungan 4.1 luas grid pentanahan)}$$

$$\rho = 100 \Omega\text{m} \text{ (diperoleh dari PUIL, 2000:80)}$$

$$L_T \text{ (panjang konduktor total)} = 2620 \text{ m} \text{ (diperoleh dari perhitungan 4.6)}$$

$$h = 0.5 \text{ m} \text{ (diperoleh dari tabel 3.1 data sistem pentanahan gardu induk 150 kV Sei Raya)}$$

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

$$R_g = 100 \Omega\text{m} \left[\frac{1}{2620 \text{ m}} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 5100 \text{ m}^2}} \left(1 + \frac{1}{1+0.5 \text{ m}\sqrt{20/5100 \text{ m}^2}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.65 \Omega$$

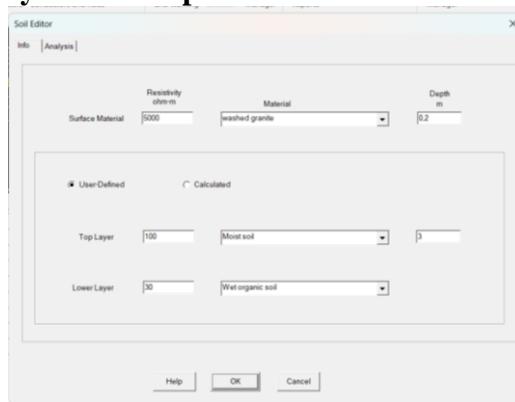
Setelah melakukan perhitungan untuk tahanan pentanahan total sistem grid – rod, diperoleh hasil $R_g = 0.65 \Omega$. Nilai ini dipengaruhi oleh jenis tanah dan resistivitas tanah $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Jenis tanah yang digunakan adalah tanah liat dengan nilai rata-rata $\rho = 100$

Ωm , akan tetapi nilai ini bisa lebih besar apabila pada kondisi musim panas dan permukaan tanah kering. Pada kondisi ini nilai ρ tanah liat bisa menyentuh $200 - 1000 \Omega\text{m}$ khususnya pada kondisi kering bahkan sampai timbul retakan tanah seperti nilai ρ pada jenis tanah kering lainnya.

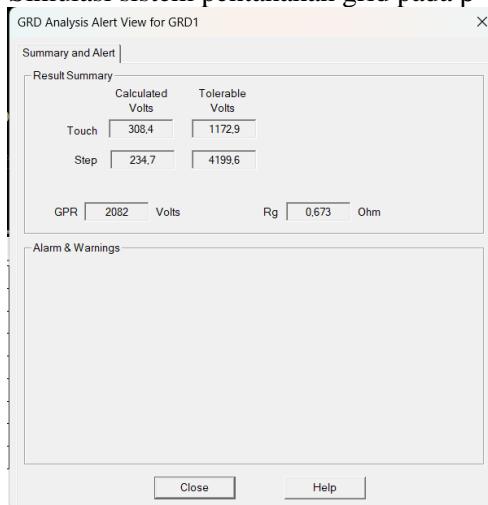
Simulasi Tahanan Pentanahan Total (Kombinasi Grid – Rod)

Simulasi ini di lakukan untuk membandingkan dengan hasil perhitungan tahanan pentanahan total kombinasi grid rod. Kelebihan dari simulasi ini terletak pada analisa jenis tanah (*soil editor*), di mana pada simulasi ini jenis tanah dapat di input menyesuaikan kondisi sebenarnya di gardu induk. Pada gardu induk Sei Raya, terdapat material permukaan batu kerikil atau batu granit yang telah melewati proses pencucian (*washed granite*), kemudian pada lapisan pertama adalah jenis tanah liat dengan kedalaman ± 3 meter dan pada lapisan kedua adalah jenis tanah rawa atau *wet organic soil*. Perbedaan lapisan tanah (*soil layer*) ini dapat dianalisis menggunakan simulasi ETAP sehingga hasilnya akan mewakili kondisi aktual di lapangan.

a. Pengaturan desain layout sistem pentanahan

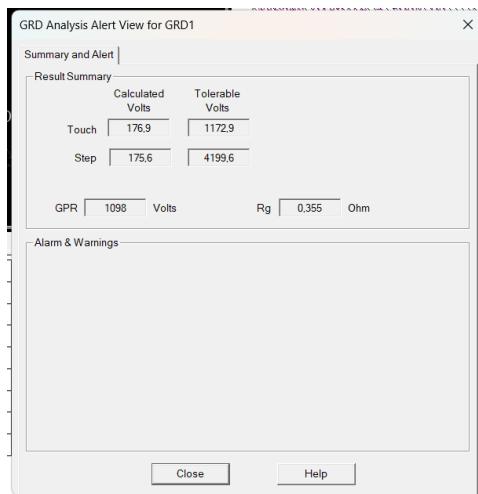


Gambar. Simulasi sistem pentanahan grid pada $\rho = 100 \Omega\text{m}$



Gambar. Hasil simulasi sistem pentanahan grid pada $\rho = 100 \Omega\text{m}$

b. Simulasi sistem pentanahan grid – rod pada $\rho = 100 \Omega\text{m}$



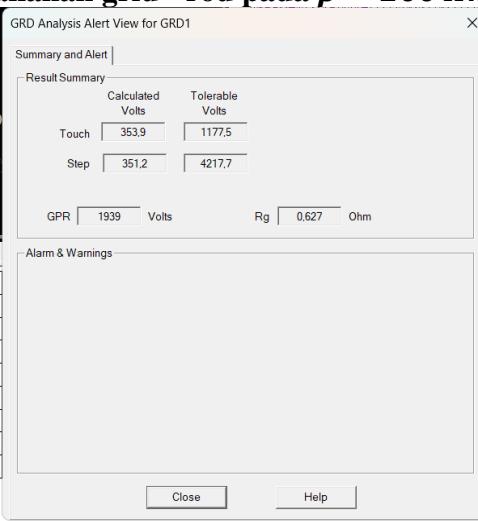
Gambar. Simulasi sistem pentanahan grid – rod pada $\rho = 100 \Omega m$

c. Simulasi sistem pentanahan grid pada $\rho = 200 \Omega m$



Gambar. Hasil simulasi sistem pentanahan grid pada $\rho = 200 \Omega m$

d. Simulasi sistem pentanahan grid - rod pada $\rho = 200 \Omega m$



Gambar. Hasil simulasi sistem pentanahan grid - rod pada $\rho = 200 \Omega m$

Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan Sistem Grid – Rod Kondisi Tanah Kering

Pengukuran tahanan pentanahan pada gardu induk 150 kV dilaksanakan pada 15 Februari 2024 menggunakan alat ukur earth tester dengan metode pengukuran yang digunakan adalah metode 3 titik (three point). Pengukuran dilakukan pada setiap bay dan setiap peralatan, pengukuran juga dilakukan pada setiap fasa.

Tabel. Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan Sistem Grid-Rod Kondisi Tanah Kering

Bay	MTU	Fasa	Nilai Tahanan Pentanahan (Ω)	Tanggal Pelaksanaan
Line 1 Sei Raya - Siantan	LA	R	0,72	15 Februari 2024
Line 1 Sei Raya - Siantan	LA	S	0,72	15 Februari 2024
Line 1 Sei Raya - Siantan	LA	T	0,72	15 Februari 2024
Line 2 Sei Raya - Siantan	PMT	R	0,72	15 Februari 2024
Line 2 Sei Raya - Siantan	PMT	S	0,72	15 Februari 2024
Line 2 Sei Raya - Siantan	PMT	T	0,73	15 Februari 2024
Coupler	PMT	R	0,914	15 Februari 2024
Coupler	PMT	S	0,716	15 Februari 2024
Coupler	PMT	T	0,716	15 Februari 2024
Trafo 1	PMT	R	0,73	15 Februari 2024
Trafo 1	PMT	S	0,73	15 Februari 2024
Trafo 1	PMT	T	0,72	15 Februari 2024
Trafo 1	Body Trafo		0,72	15 Februari 2024

Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan Sistem Grid – Rod Kondisi Tanah Lembab

Pengukuran tahanan pentanahan pada gardu induk 150 kV dilaksanakan pada 15 Februari 2025 menggunakan alat ukur earth tester dengan metode pengukuran yang digunakan adalah metode 3 titik (three point). Pengukuran dilakukan pada setiap bay dan setiap peralatan, pengukuran juga dilakukan pada setiap fasa.

Tabel. Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan Sistem Grid-Rod Kondisi Tanah Lembab

Bay	MTU	Fasa	Nilai Tahanan Pentanahan (Ω)	Tanggal Pelaksanaan
Line 1 Sei Raya - Siantan	LA	R	0,3	15 Februari 2025
Line 1 Sei Raya - Siantan	LA	S	0,3	15 Februari 2025
Line 1 Sei Raya - Siantan	LA	T	0,3	15 Februari 2025
Line 2 Sei Raya - Siantan	PMT	R	0,2	15 Februari 2025
Line 2 Sei Raya - Siantan	PMT	S	0,3	15 Februari 2025
Line 2 Sei Raya - Siantan	PMT	T	0,0	15 Februari 2025
Coupler	PMT	R	0,3	15 Februari 2025
Coupler	PMT	S	0,3	15 Februari 2025

Coupler	PMT	T	0,2	15 Februari 2025
Trafo 1	PMT	R	0,2	15 Februari 2025
Trafo 1	PMT	S	0,2	15 Februari 2025
Trafo 1	PMT	T	0,3	15 Februari 2025
Trafo 1	Body Trafo		0,3	15 Februari 2025

Sistem pentanahan yang mengkombinasikan elektroda grid (jaringan) dan rod (batang) pada dasarnya bekerja sebagai sebuah rangkaian resistor paralel. Arus gangguan yang dialirkan ke sistem pentanahan akan "melihat" dua jalur utama untuk didisipasikan ke dalam tanah:

1. Jalur melalui Grid (R_{grid}): Elektroda grid yang ditanam dangkal di lapisan tanah atas.
2. Jalur melalui Rod (R_{rod}): Elektroda batang vertikal yang menembus lebih dalam ke lapisan tanah bawah.

Dapat dipahami bahwa nilai R_{total} akan selalu lebih kecil daripada nilai resistansi individu terkecil, baik itu R_{grid} maupun R_{rod} . Nilai R_{grid} sangat bergantung pada resistivitas lapisan tanah permukaan (ρ_1). Jika lapisan ini memiliki resistivitas tinggi (misalnya tanah liat yang kering), maka nilai R_{grid} akan tinggi. Nilai R_{rod} dipengaruhi oleh kedua lapisan tanah. Batang tersebut harus menembus lapisan atas (ρ_1) untuk mencapai lapisan bawah (ρ_2). Jika lapisan bawah jauh lebih konduktif ($\rho_2 < \rho_1$), maka R_{rod} akan memiliki nilai yang sangat rendah.

Efektivitas penambahan rod dalam menurunkan nilai tahanan pentanahan pada sistem grid sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi tanah serta faktor lingkungan. Pada kondisi ideal, tanah memiliki struktur berlapis di mana lapisan bawah memiliki resistivitas yang jauh lebih rendah dibandingkan lapisan atas. Dalam situasi ini, penambahan rod menjadi sangat efektif karena rod berfungsi sebagai jalur langsung bagi arus menuju lapisan tanah yang lebih konduktif. Mekanismenya mirip dengan sistem paralel, di mana tahanan grid yang relatif tinggi diparalelkan dengan tahanan rod yang rendah, sehingga nilai total mendekati tahanan terendah. Hasilnya, resistansi sistem dapat turun signifikan hingga mencapai nilai optimal, misalnya $0,3 \Omega$ sesuai hasil pengukuran dan simulasi.

Namun, efektivitas ini dapat berkurang pada kondisi lingkungan yang kurang mendukung, seperti saat musim kemarau. Kekeringan membuat lapisan tanah atas menjadi sangat kering sehingga resistivitasnya meningkat drastis. Akibatnya, tahanan grid naik karena seluruh grid berada di lapisan tanah tersebut. Meskipun rod tetap menembus ke lapisan bawah yang lebih baik, kontribusinya dalam menurunkan resistansi total menjadi terbatas. Hal ini menjelaskan mengapa hasil pengukuran di lapangan hanya mencapai $0,6 \Omega$ diakibatkan resistivitas tanah yang tinggi dapat mencapai $150 \Omega\text{m}$.

Dengan demikian, penambahan rod terbukti sangat efektif pada kondisi tanah berlapis yang ideal karena mampu menurunkan resistansi total secara signifikan. Namun, efektivitas tersebut bisa menurun sementara akibat faktor lingkungan, khususnya saat resistivitas lapisan permukaan meningkat. Meski begitu, rod tetap memberikan manfaat penting karena menjaga nilai resistansi sistem agar tidak melonjak terlalu tinggi, meskipun kondisi tanah tidak mendukung secara optimal.

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 :

$$\begin{aligned}
 E_{s50} &= (1000 \Omega + 6C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \\
 &= (1000 \Omega + 6 \times 0,82 \times 5000 \Omega \cdot \text{m}) \frac{0.116}{\sqrt{0,5}} \\
 &= 4199,65 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Berat badan 70 kg :

$$\begin{aligned}
 E_{s70} &= (1000 \Omega + 6C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \\
 &= (1000 \Omega + 6 \times 0,82 \times 5000 \Omega \cdot \text{m}) \frac{0.157}{\sqrt{0,5}} \\
 &= 5684,01 \text{ V}
 \end{aligned}$$

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 :

$$\begin{aligned}
 E_{t50} &= (1000 \Omega + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \\
 &= (1000 \Omega + 1.5 \times 0,82 \times 5000 \Omega \cdot \text{m}) \frac{0.116}{\sqrt{0,5}} \\
 &= 1172,95 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Berat badan 70 kg :

$$\begin{aligned}
 E_{t70} &= (1000 \Omega + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \\
 &= (1000 \Omega + 1.5 \times 0,82 \times 5000 \Omega \cdot \text{m}) \frac{0.157}{\sqrt{0,5}} \\
 &= 1587,53 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh yang Sebenarnya

a. Tegangan langkah sebenarnya

Untuk menghitung tegangan langkah sebenarnya dapat menggunakan persamaan berikut.

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_S}$$

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 = keliling grid

$$L_p = 2(102 \text{ m} + 50 \text{ m})$$

$$L_p = 304 \text{ m}$$

maka,

$$n_a = 2 \times \frac{2020 \text{ m}}{304 \text{ m}}$$

$$n_a = 13 \text{ buah}$$

$$n_a = 13, \text{ karena}$$

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

$n_c = 1$ untuk grid persegi panjang

$n_d = 1$ untuk grid persegi panjang

maka,

$$n = 13 \times 1 \times 1 \times 1 = 13 \text{ buah}$$

Faktor K_i dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} K_i &= 0,644 + 0,148 \times n \\ &= 0,644 + 0,148 \times 13 \\ &= 2,5680 \end{aligned}$$

Faktor K_s dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} K_s &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{N-2}) \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{0,5} + \frac{1}{16+0,5} + \frac{1}{16} (1 - 0,5^{13-2}) \right] \\ &= 0,6758 \end{aligned}$$

Terakhir, menghitung tegangan langkah sebenarnya dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_s} \\ &= \frac{90 \Omega \times 0,6758 \times 2,5680 \times 3093 A}{2025 \text{ m}} \\ &= 265,07 V \end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned} K_{ii} &= \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 13)^{\frac{2}{13}}} \\ &= 0,6 \end{aligned}$$

Faktor K_h dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} K_h &= \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \\ &= 1,224 \end{aligned}$$

Faktor K_m dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right] \\ &= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{16^2}{16 \times 0,5 \times 16} + \frac{(16+2 \times 0,5)^2}{8 \times 16 \times 16} - \frac{0,5}{4 \times 16} \right) + \frac{0,5}{1,224} \ln \frac{8}{\pi(2 \times 13-1)} \right] \\ &= 1,0418 \end{aligned}$$

Terakhir, menghitung tegangan sentuh sebenarnya dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
 E_t &= \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_m} \\
 &= \frac{90 \Omega \times 1,0418 \times 2,5680 \times 3093 \text{ A}}{2975,77 \text{ m}} \\
 &= 278,07 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Analisa

Tabel. Tahanan Pentanahan, Tegangan Langkah Dan Tegangan Sentuh

Sistem Pentanahan	Tahanan Pentanahan (Ω)		
	Eksisting	Perhitungan	Simulasi
Sistem pentanahan grid-rod kondisi kering ($\rho = 200 \Omega \text{m}$)	0,72	1,3	0,627
Sistem pentanahan grid-rod kondisi lembab ($\rho = 100 \Omega \text{m}$)	0,3	0,65	0,355
Sistem pentanahan grid ($\rho = 100 \Omega \text{m}$)	-	0,66	0,673
Sistem pentanahan grid ($\rho = 200 \Omega \text{m}$)	-	1,33	1,346
Tegangan Langkah yang Diizinkan 50 kg		4199,65 V	
Tegangan Langkah yang Diizinkan 70 kg		5684,01 V	
Tegangan Sentuh yang Diizinkan 50 kg		1172,95 V	
Tegangan Sentuh yang Diizinkan 70 kg		1587,53 V	
Tegangan langkah yang Sebenarnya		265,07 V	
Tegangan Sentuh yang Sebenarnya		278,07 V	

Sistem pentanahan yang diterapkan di gardu induk 150 kV Sei Raya adalah sistem pentanahan grid-rod, dengan panjang konduktor pentanahan sumbu x 102 meter dan panjang konduktor pentanahan sumbu y 50 meter. Total batang rod yang digunakan adalah 150 buah dengan panjang masing – masing batang rod adalah 4 meter. Grid pentanahan ditanam sedalam 0,5 m dari permukaan tanah dengan jenis tanah pada lokasi gardu induk Sei Raya adalah tanah kuning atau tanah liat. Di atas permukaan tanah terdapat batu pecah atau batu kerikil yang telah dibersihkan (washed granite) dengan ketebalan permukaan 20 cm yang berfungsi sebagai lapisan permukaan tanah.

Analisis sistem pentanahan di gardu induk 150 kV Sei Raya di lakukan untuk mengetahui nilai tahanan pentanahan total (R_{total}) di Gardu Induk 150 kV Sei Raya dengan menggunakan kombinasi grid dan rod. Selanjutnya untuk mengetahui seberapa efektif penambahan rod dalam menurunkan nilai tahanan pentanahan dan apakah hasil yang didapat telah sesuai dengan standar keamanan IEEE Std 80-2013 dan SPLN T5.012, “Pantanahan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi,” no. 0053, 2020.

Berdasarkan hasil perhitungan, tahanan pentanahan total adalah 0.65Ω , berdasarkan pengukuran pada kondisi kering adalah rata-rata 0.7Ω . Berdasarkan analisa dengan simulasi, dapat diketahui bahwa pada kondisi tahanan pentanahan sebesar itu, nilai resistivitas tanah dapat mencapai $150 \Omega \text{m}$. Nilai tahanan pentanahan ini masih belum memenuhi standar keamanan yang diberikan oleh SPLN T5.012, “Pantanahan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi,” no. 0053, 2020, di mana batas aman tahanan pentanahan yang diberikan adalah $\leq 0.5 \Omega$. Akan tetapi berdasarkan IEEE Std 80-2013, nilai ini masih dalam batas yaitu 0 atau $\leq 1 \Omega$. Akan tetapi, jika pada kondisi tanah lembab dengan resistivitas tanah $100 \Omega \text{m}$ nilai tahanan pentanahan pada gardu induk 150 kV sudah sangat aman dan memenuhi standar SPLN T5.012, “Pantanahan Pada Gardu Induk Dan Jaringan Transmisi,” no. 0053, 2020 dan IEEE Std 80-2013. Di mana nilai tahanan pentanahan yang dihasilkan berdasarkan pengukuran dan simulasi adalah rata-rata 0.3Ω .

Persamaan atau rumus standar perhitungan manual (Model Homogen) untuk menghitung resistansi pentanahan (seperti rumus Dwight, Schwarz, IEEE.) seringkali didasarkan pada asumsi fundamental bahwa tanah bersifat homogen. Artinya, nilai resistivitas tanah (ρ) dianggap seragam di seluruh volume tanah tempat sistem pentanahan ditanam. Dalam penelitian ini, perhitungan menghasilkan tahanan pentanahan 0.6Ω karena model ini tidak memperhitungkan adanya lapisan tanah dengan konduktivitas yang lebih baik di kedalaman yang lebih dalam, baik grid maupun rod, seolah-olah tertanam dalam satu jenis tanah saja. Sementara simulasi dengan model multi-lapisan menggunakan perangkat lunak simulasi seperti ETAP memungkinkan pemodelan tanah yang jauh lebih realistik, yaitu model multi-lapisan (multi-layer). Simulasi dalam penelitian ini menghasilkan tahanan pentanahan 0.3Ω yang mencerminkan kondisi nyata di lapangan, di mana lapisan atas (ρ_1) adalah Tanah liat dengan resistivitas $100 \Omega\text{m}$ dan lapisan bawah (ρ_2) adalah Lapisan tanah rawa yang lebih konduktif (resistivitas lebih rendah) yang dapat dijangkau oleh elektroda batang (rod). Nilai 0.3Ω adalah representasi kinerja ideal sistem pentanahan pada gardu induk 150 kV Sei Raya. Rendahnya nilai ini menunjukkan bahwa peran elektroda batang (rod) sangat signifikan. Batang tersebut berhasil menembus lapisan atas dan mencapai lapisan bawah yang lebih konduktif, sehingga menyediakan jalur arus berimpedansi rendah yang tidak dapat dimodelkan oleh perhitungan homogen.

Hasil pengukuran tahanan pentanahan pada gardu induk 150 kV Sei Raya yang menunjukkan 0.6Ω secara kebetulan sama dengan hasil perhitungan manual. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh kondisi musim kemarau atau cuaca panas saat pengukuran di lakukan. Tanah liat, sebagai lapisan atas, memiliki karakteristik di mana resistivitasnya sangat sensitif terhadap kadar air. Selama musim kemarau, air di lapisan permukaan menguap, menyebabkan tanah menjadi kering dan retak. Akibatnya, resistivitas lapisan atas (ρ_1) meningkat secara drastis. Peningkatan resistivitas lapisan atas ini secara efektif mengurangi efektivitas bagian grid dari sistem pentanahan, karena grid tertanam sepenuhnya di dalam lapisan yang kering ini. Meskipun elektroda batang (rod) masih mencapai lapisan bawah yang lebih stabil dan konduktif, kenaikan signifikan pada resistansi komponen grid menyebabkan resistansi total sistem (R_{total}) meningkat. Jika di bandingkan dengan simulasi di mana nilai tahanan pentanahan total sebenarnya jika pada kondisi tanah liat lembab dengan resistivitas $100 \Omega\text{m}$ adalah sebesar 0.3Ω . Hal ini dapat divalidasi dengan bukti hasil pengukuran yang di lakukan pada saat kondisi tanah lembab dan hasil tahanan pentanahan adalah 0.3Ω . Maka dapat disimpulkan bahwa saat pengujian pada kondisi tanah kering nilai resistivitas tanah liat meningkat cukup tinggi. Jika dianalisis dengan simulasi ETAP, maka resistivitas tanah liat pada kondisi tersebut dapat menyentuh nilai $150 \Omega\text{m}$. Hasil Simulasi (0.3Ω) pada gardu induk 150 kV Sei Raya adalah potensi kinerja terbaik dari sistem pentanahan grid-rod. Nilai ini valid di bawah asumsi kondisi tanah "normal" atau rata-rata (tidak terlalu kering, tidak terlalu basah), di mana terdapat dua lapisan tanah yang berbeda dan elektroda batang berhasil menjangkau lapisan yang lebih konduktif.

Berdasarkan hasil perhitungan, tegangan langkah yang diizinkan untuk berat badan manusia 50 kg dan 70 kg masing-masing sebesar $4199,65 \text{ V}$ dan $5684,01 \text{ V}$, sedangkan tegangan langkah yang terjadi sebenarnya hanya sebesar $265,07 \text{ V}$, sehingga nilainya jauh berada di bawah batas aman yang diizinkan. Hal serupa juga terjadi pada tegangan sentuh, di mana tegangan sentuh yang diizinkan masing-masing sebesar $1172,95 \text{ V}$ untuk berat badan 50 kg dan $1587,53 \text{ V}$ untuk berat badan 70 kg , sementara tegangan sentuh sebenarnya yang terjadi pada sistem pentanahan hanya sebesar $278,07 \text{ V}$. Perbedaan yang signifikan antara nilai tegangan yang diizinkan dan tegangan yang sebenarnya

menunjukkan bahwa sistem pentahanan gardu induk mampu mereduksi gradien tegangan permukaan tanah dan Ground Potential Rise (GPR) secara efektif. Dengan demikian, konfigurasi grid pentahanan, panjang konduktor, serta nilai tahanan jenis tanah yang digunakan telah memenuhi kriteria keselamatan, sehingga sistem pentahanan dapat dinyatakan aman terhadap risiko keselamatan peralatan dan personil akibat tegangan langkah dan tegangan sentuh pada kondisi gangguan.

KESIMPULAN

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

1. Ukuran luas penampang elektroda yang digunakan pada sistem pentahanan gardu induk 150 kV Sei Raya sudah sesuai dengan standar ketentuan dari IEEE Std 80-2013 (*Guide for Safety in AC Substation Pentahanan*) dengan luas penampang yang digunakan adalah 120 mm^2 .
2. Dari hasil perhitungan, pengukuran dan simulasi sistem pentahanan pada gardu induk 150 kV Sei Raya nilai resistansi pentahanan masih kurang dari batas yang diizinkan oleh SPLN. Nilai resistansi pentahanan berdasarkan pengukuran di lapangan diperoleh dengan nilai rata-rata $0,7 \Omega$, sementara standar SPLN T5.012:2020 menyatakan batas resistansi pentahanan adalah $\leq 0,5 \Omega$. Akan tetapi nilai ini masih dalam batas aman yang ditentukan oleh IEEE Std 80-2013 yang menyatakan batas resistansi pentahanan adalah mendekati nilai 0 atau $\leq 1 \text{ Ohm}$.
3. Pada Kondisi normal tanah liat lembab dengan resistivitas rata-rata $100 \Omega\text{m}$ nilai tahanan pentahanan adalah $0,3 \Omega$. Sistem pentahanan Gardu Induk 150 kV Sei Raya sangat aman dan memenuhi standar SPLN T5.012 ($\leq 0,5 \Omega$) dan IEEE Std 80-2013 ($\leq 1 \Omega$). Sementara pada kondisi kering, tahanan pentahanan berkisar $0,6 \Omega$ - $0,7 \Omega$. Sistem tidak memenuhi standar SPLN T5.012, namun masih memenuhi standar IEEE Std 80-2013. Hal ini menunjukkan adanya potensi penurunan tingkat keamanan sistem saat musim kemarau.
4. Sistem pentahanan yang mengkombinasikan elektroda grid dan rod terbukti sangat efektif untuk menurunkan nilai tahanan pentahanan total, terutama pada kondisi tanah yang tidak homogen atau berlapis.
5. Berdasarkan hasil perhitungan, tegangan langkah yang sebenarnya pada sistem pentahanan gardu induk 150 kV Sei Raya sebesar $265,07 \text{ V}$, lebih kecil dibandingkan tegangan langkah yang diizinkan yaitu $4199,65 \text{ V}$ untuk berat badan 50 kg dan $5684,01 \text{ V}$ untuk berat badan 70 kg , sehingga sistem pentahanan memenuhi kriteria keselamatan terhadap bahaya tegangan langkah. Untuk tegangan sentuh yang sebenarnya sebesar $278,07 \text{ V}$, masih berada di bawah batas tegangan sentuh yang diizinkan yaitu $1172,95 \text{ V}$ untuk berat badan 50 kg dan $1587,53 \text{ V}$ untuk berat badan 70 kg , yang menunjukkan bahwa sistem pentahanan mampu memberikan perlindungan terhadap risiko kejutan listrik akibat tegangan sentuh.

Saran

1. Untuk meningkatkan keandalan sistem pentahanan pada gardu induk 150 kV Sei Raya dan mengingat efektivitas elektroda rod sangat tinggi, dapat di lakukan studi penelitian untuk menambah jumlah rod pada titik-titik kritis atau memperdalam rod yang sudah ada. Tujuannya adalah untuk membuat sistem lebih dominan bergantung pada lapisan tanah bawah yang stabil dan mengurangi ketergantungan pada lapisan permukaan yang rentan terhadap cuaca.

2. Perlu dilakukan inspeksi dan pemeliharaan rutin terhadap peralatan yang rentan mengalami kerusakan isolasi, karena faktor ini merupakan penyebab utama gangguan fasa ke tanah.
3. Kebersihan dan kondisi lingkungan gardu perlu terus dijaga, termasuk pembersihan isolator, pengendalian vegetasi, serta pencegahan masuknya hewan ke area peralatan.
4. Pengukuran resistansi pentanahan harus dilakukan secara berkala untuk memastikan nilai grounding tetap memenuhi standar, terutama saat terjadi perubahan kondisi tanah. Keempat, jika arus gangguan menunjukkan kecenderungan meningkat, PLN dapat mempertimbangkan penambahan grid atau *ground rod* guna meningkatkan kinerja sistem pentanahan.
5. Untuk pengembangan penelitian ini, kiranya dapat dilakukan Simulasi Optimasi Desain dengan Memanfaatkan perangkat lunak simulasi (seperti ETAP yang sudah terbukti valid) untuk melakukan studi optimasi. Skenario yang dapat disimulasikan antara lain:
 - Jumlah rod yang paling optimal untuk mencapai tahanan $< 0.5 \Omega$ secara konsisten dengan biaya seminimal mungkin.
 - Pengaruh mengubah kedalaman tanam grid (misalnya dari 0,5 m menjadi 1 m).
 - Pola dan penempatan titik rod yang paling efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin. (2021). Analisis Sistem Pentanahan Menggunakan Elektroda Rod dan Plat pada Instalasi Listrik. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(1), 45–52.
- Hutauruk, T. S. (2021). Pentanahan Netral Sistem Tenaga Listrik. Andi Publisher.
- IEEE. (2013). IEEE Guide for Safety in AC Substation Pentanahan (IEEE Std 80-2013). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Kurnia, A. (2014). Keandalan Sistem Pentanahan pada Instalasi Listrik Gardu Induk. *Jurnal Teknik Listrik*, 6(2), 77–84.
- Nugraha, A., Santosa, B., & Wibowo, R. (2023). Pengaruh Kedalaman dan Jumlah Rod terhadap Nilai Pentanahan Sistem Axle Counter. *Jurnal Teknologi Listrik*, 11(1), 15–24.
- Pranoto, A., & Hans, R. (2018). Analisis Pentanahan Grid pada Gardu Induk Bertegangan Tinggi. *Jurnal Energi*, 9(2), 123–130.
- PUIL. (2000). Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2000). Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Putra, D., Syahputra, F., & Mahendra, H. (2023). Evaluasi Sistem Pentanahan pada Trafo PLTA Singkarak. *Jurnal Elektro Energi*, 10(3), 60–67.
- Sanjoyo, R., Andika, T., & Nugroho, Y. (2020). Analisa Sistem Pentanahan Kombinasi Grid-Rod pada Gardu Distribusi. *Jurnal Teknik Tenaga*, 7(1), 10–18.
- SNI. (2011). Sistem Proteksi Petir pada Bangunan Gedung (SNI 03-7015-2004). Badan Standardisasi Nasional.
- SPLN. (2020). Persyaratan Sistem Pentanahan pada Gardu Induk (SPLN T5.012:2020). PT PLN (Persero).
- Sunarhati. (2017). Sistem Pentanahan pada Instalasi Listrik Tegangan Tinggi. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 5(3), 88–94.
- Tadjuddin. (1998). Sistem Pentanahan dalam Instalasi Tenaga Listrik. Pustaka Teknik.
- Tasiam, J. (2017). Sistem Proteksi pada Jaringan Transmisi 150 kV. *Jurnal Teknik dan Rekayasa*, 4(2), 99–108.