

## **Analisis Sistem Pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV Menggunakan Simulasi ETAP Berdasarkan IEEE Std 80-2013**

**M. Fajri Ramadhan<sup>1</sup>, Abdul Azis<sup>2\*</sup>, Irine Kartika Pebrianti<sup>3</sup>**

<sup>1,2\*,3</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Palembang, Indonesia

\*e-mail : [azis@univpgri-palembang.ac.id](mailto:azis@univpgri-palembang.ac.id)

### **ABSTRAK**

Sistem pentanahan pada gardu induk berperan penting dalam menjaga keselamatan personel dan keandalan peralatan dengan menyalurkan arus gangguan ke tanah serta membatasi tegangan sentuh dan tegangan langkah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV berdasarkan IEEE Std 80-2013 melalui perhitungan manual dan simulasi menggunakan software ETAP. Analisis dilakukan terhadap parameter resistansi pentanahan, arus grid, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah menggunakan data sistem pentanahan eksisting dengan konfigurasi grid-rod. Hasil perhitungan manual menunjukkan nilai resistansi pentanahan sebesar 0,55  $\Omega$ , sedangkan hasil simulasi ETAP sebesar 0,552  $\Omega$ . Nilai Ground Potential Rise (GPR) yang diperoleh masing-masing sebesar 3300 V dan 3363,3 V. Simulasi ETAP menghasilkan tegangan sentuh aktual sebesar 468 V dan tegangan langkah aktual sebesar 364,9 V, yang masih berada di bawah batas tegangan yang diizinkan berdasarkan IEEE Std 80-2013 untuk berat badan 50 kg maupun 70 kg. Perbandingan hasil perhitungan manual dan simulasi menunjukkan perbedaan yang relatif kecil, sehingga hasil simulasi ETAP memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap perhitungan manual. Kontribusi penelitian ini adalah memberikan verifikasi kesesuaian hasil perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013 dengan simulasi ETAP pada sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV, sehingga dapat menjadi referensi dalam evaluasi dan validasi desain sistem pentanahan gardu induk. Berdasarkan hasil tersebut, sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV memenuhi kriteria keselamatan menurut IEEE Std 80-2013, dan software ETAP dapat digunakan sebagai alat yang efektif untuk mengevaluasi serta memvalidasi kinerja sistem pentanahan gardu induk.

**Kata Kunci:** Sistem pentanahan, Gardu Induk 150 kV, IEEE Std 80-2013, ETAP, Pentanahan

## ***Analysis of the Grounding System of the New Jakabaring 150 kV Substation Using ETAP Simulation Based on IEEE Std 80-2013***

### **ABSTRACT**

The grounding system in a substation plays a crucial role in ensuring personnel safety and equipment reliability by dissipating fault currents into the ground while limiting touch voltage and step voltage. This study aims to analyze the performance of the grounding system at the New Jakabaring 150 kV Substation based on IEEE Std 80-2013 through manual calculations and simulations using ETAP software. The analysis was conducted on grounding resistance, grid current, Ground Potential Rise (GPR), touch voltage, and step voltage using the existing grid-rod grounding system configuration. The manual calculation resulted in a grounding resistance of 0.55  $\Omega$ , while the ETAP simulation produced a value of 0.552  $\Omega$ . The corresponding Ground Potential Rise (GPR) values were 3300 V and 3363.3 V, respectively. The ETAP simulation yielded an actual touch voltage of 468 V and an actual step voltage of 364.9 V, both of which remain below the permissible limits specified by IEEE Std 80-2013 for body weights of 50 kg and 70 kg. The comparison between the manual calculations and ETAP simulation indicates only minor differences, demonstrating a high level of agreement between the two approaches. The contribution of this study lies in verifying the consistency between manual calculations based on IEEE Std 80-2013 and ETAP simulation for the grounding system of the New Jakabaring 150 kV Substation, providing a practical reference for the evaluation and validation of substation grounding system designs. Based on the obtained results, the grounding system of the New Jakabaring 150 kV Substation complies with the safety requirements specified in IEEE Std 80-2013, and ETAP can be effectively utilized as a reliable tool for evaluating and validating substation grounding system performance.

**Keywords:** *Grounding system, 150 kV substation, IEEE Std 80-2013, ETAP, Ground Potential Rise*

## PENDAHULUAN

Sistem pentanahan (grounding system) merupakan salah satu komponen utama pada gardu induk yang berfungsi sebagai jalur pelepasan arus gangguan ke tanah untuk melindungi personel, peralatan, serta menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Ketika terjadi gangguan hubung singkat ke tanah atau surja petir, sistem pentanahan harus mampu membatasi nilai Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage) agar tetap berada pada batas aman. Kegagalan sistem pentanahan dalam memenuhi persyaratan keselamatan dapat meningkatkan risiko kecelakaan kerja, kerusakan peralatan, dan terganggunya kontinuitas penyaluran tenaga listrik. Oleh karena itu, evaluasi sistem pentanahan perlu mengacu pada IEEE Std 80-2013, yang menjadi standar internasional dalam analisis dan perancangan sistem pentanahan gardu induk [1].

Perkembangan perangkat lunak analisis sistem tenaga telah meningkatkan akurasi dan efisiensi evaluasi sistem pentanahan. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan adalah Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) karena mampu memodelkan konfigurasi ground grid, karakteristik tanah, arus gangguan, serta menghitung parameter keselamatan sesuai metode pada IEEE Std 80-2013. Dladla et al. menunjukkan bahwa simulasi ETAP dapat digunakan untuk mengevaluasi dan menyempurnakan desain earth grid sehingga parameter keselamatan memenuhi standar IEEE [2]. Optimasi konfigurasi grid melalui simulasi mampu meningkatkan kinerja sistem pentanahan sekaligus mengurangi risiko tegangan sentuh dan tegangan langkah yang melebihi batas aman [3,4]. Evaluasi nilai tahanan pentanahan secara berkala diperlukan untuk menjamin keselamatan peralatan dan kontinuitas penyaluran energi listrik [5].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa karakteristik tanah dan konfigurasi sistem pentanahan merupakan faktor yang sangat memengaruhi performa sistem grounding. Fitriani et al. melaporkan bahwa resistivitas tanah berpengaruh langsung terhadap nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah [6], sedangkan Panjaitan et al. menunjukkan bahwa variasi luas area dan jumlah elektroda mampu menurunkan nilai resistansi pentanahan secara signifikan [7]. Permal et al. menjelaskan bahwa penggunaan model tanah homogen pada beberapa kondisi dapat menghasilkan evaluasi yang kurang akurat sehingga karakteristik tanah perlu dipertimbangkan dalam analisis sistem pentanahan [8,9]. Sementara itu, penelitian lain mengembangkan metode perhitungan Ground Potential Rise (GPR) dan impedansi pentanahan untuk meningkatkan ketelitian analisis pada berbagai kondisi tanah dan konfigurasi elektroda [10,11].

Di Indonesia, penelitian mengenai sistem pentanahan gardu induk juga terus berkembang. Cahyono dan Sumarno mengevaluasi sistem pentanahan Gardu Induk 150 kV Serpong berdasarkan IEEE Std 80-2013 melalui pendekatan teoritis dan simulasi [12]. Hardi et al. merancang sistem pentanahan Gardu Induk Galang menggunakan ETAP dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomis [13]. Romadani dan Hajar melakukan evaluasi tahanan pentanahan pada peralatan *switchyard* untuk mengetahui kondisi sistem pentanahan eksisting [14], sedangkan Sinaga et al. membandingkan hasil analisis sistem pembumian menggunakan ETAP dan MATLAB sebagai bentuk verifikasi hasil simulasi [15]. Pratiwi dan Suryanto juga menerapkan simulasi ETAP untuk menganalisis sistem pentanahan Gardu Induk 150 kV Temanggung berdasarkan parameter keselamatan sesuai IEEE Std 80-2013 [16].

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah memberikan kontribusi dalam pengembangan analisis sistem pentanahan gardu induk, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi desain, pengaruh karakteristik tanah, evaluasi parameter keselamatan pada gardu induk tertentu, atau pemanfaatan perangkat lunak simulasi sebagai alat analisis. Belum banyak penelitian yang secara khusus mengintegrasikan perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013 dengan simulasi ETAP untuk memverifikasi kesesuaian parameter keselamatan pada Gardu Induk New Jakabaring 150 kV. Selain itu, informasi mengenai kesesuaian nilai resistansi pentanahan, arus grid, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah pada gardu induk tersebut belum tersedia sebagai referensi ilmiah. Kondisi ini menunjukkan adanya research gap yang perlu dikaji lebih lanjut sebagai dasar evaluasi sistem pentanahan pada Gardu Induk New Jakabaring 150 kV.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi berupa evaluasi sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV melalui pendekatan perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013 dan verifikasi menggunakan simulasi ETAP. Pendekatan ini tidak hanya digunakan untuk menilai kesesuaian parameter keselamatan sistem pentanahan terhadap standar IEEE Std 80-2013, tetapi juga untuk menunjukkan tingkat konsistensi hasil antara perhitungan manual dan simulasi ETAP.

Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi bagi evaluasi sistem pentanahan gardu induk 150 kV serta mendukung penerapan simulasi ETAP sebagai alat verifikasi dalam analisis sistem pentanahan.

#### **METODE PENELITIAN**

Pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan April sampai dengan bulan Mei 2024. Tempat penelitian adalah Gardu Induk 150 kV New Jakabaring terletak di Jalan Gub. H. Bastari Palembang Kelurahan Plaju Darat, Kecamatan Plaju, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30267. Objek penelitian adalah Sistem Pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV.

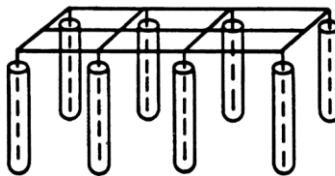


**Gambar 1. Lokasi penelitian**

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif dengan pendekatan analisis komparatif. Analisis dilakukan melalui perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013 dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP. Hasil kedua metode kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi parameter sistem pentanahan, meliputi resistansi pentanahan, arus grid, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah, serta menentukan kesesuaiannya terhadap batas keselamatan yang dipersyaratkan oleh IEEE Std 80-2013.

#### **Parameter Sistem Pentanahan Berdasarkan IEEE Std 80-2013**

Sistem pentanahan grid-rod merupakan kombinasi antara konduktor grid yang ditanam secara horizontal dan elektroda batang (ground rod) yang dipasang secara vertikal pada titik-titik tertentu pada jaringan grid. Kombinasi tersebut bertujuan untuk menurunkan nilai resistansi pentanahan, memperbaiki distribusi arus gangguan ke dalam tanah, serta mengurangi tegangan sentuh dan tegangan langkah sehingga memenuhi persyaratan keselamatan sesuai IEEE Std 80-2013 [2,7,16].



**Gambar 2. Konfigurasi Sistem Pentanahan Grid-Rod**

Analisis sistem pentanahan dilakukan berdasarkan ketentuan IEEE Std 80-2013 melalui perhitungan beberapa parameter utama, yaitu faktor reduksi permukaan tanah (surface layer derating factor), tegangan sentuh yang diizinkan, tegangan langkah yang diizinkan, resistansi pentanahan (ground grid resistance), arus grid simetris, arus grid maksimum, dan Ground Potential Rise (GPR) [1,2,12,16]. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi tingkat keselamatan sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV.

##### **1. Faktor Reduksi Permukaan Tanah**

Faktor reduksi permukaan tanah (surface layer derating factor,  $C_s$ ) dihitung untuk mengetahui pengaruh lapisan batu pecah terhadap besarnya tegangan yang diterima oleh tubuh manusia. Nilai  $C_s$  dihitung menggunakan Persamaan (1) sesuai IEEE Std 80-2013 [1,2,12,16].

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

dengan:

$C_s$  = faktor reduksi

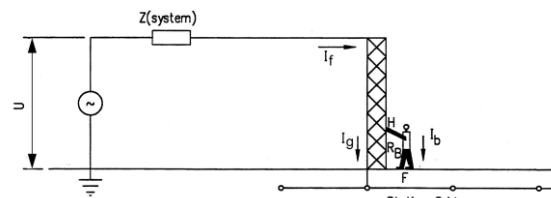
$\rho$  = resistivitas tanah ( $\Omega m$ )

$\rho_s$  = resistivitas lapisan batu pecah ( $\Omega m$ )

$h_s$  = ketebalan lapisan batu pecah (m)

## 2. Tegangan Sentuh yang Diizinkan

Tegangan sentuh (touch voltage) adalah beda potensial antara bagian logam yang dapat disentuh dan permukaan tanah tempat seseorang berpijak. Kondisi ini terjadi ketika seseorang menyentuh peralatan yang terhubung ke sistem pentanahan sehingga tubuh menjadi jalur aliran arus gangguan. Ilustrasi tegangan sentuh diperlihatkan pada Gambar 3. Nilai batas tegangan sentuh yang diizinkan dihitung berdasarkan ketentuan IEEE Std 80-2013 [1,16].



**Gambar 3. Tegangan Sentuh**

Persamaan tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat badan 50 kg dan 70 kg adalah sebagai berikut [1]:

$$E_{t50} = [1000 + 1,5\rho_s C_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

$$E_{t70} = [1000 + 1,5\rho_s C_s] \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

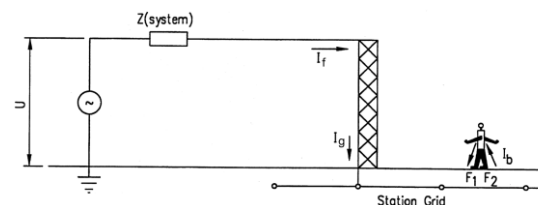
dengan:

$E_{t50}$  = tegangan sentuh yang diizinkan (V)

$t$  = waktu gangguan (s)

## 3. Tegangan Langkah yang Diizinkan

Tegangan langkah (step voltage) merupakan beda potensial pada permukaan tanah antara dua titik yang berjarak sekitar satu langkah (1 m). Tegangan ini dapat dialami oleh seseorang ketika kedua kakinya berada pada dua titik dengan potensial yang berbeda tanpa melakukan kontak dengan bagian logam atau peralatan yang terhubung ke sistem pentanahan. Ilustrasi tegangan langkah ditunjukkan pada Gambar 4. Perhitungan batas tegangan langkah yang diizinkan mengacu pada IEEE Std 80-2013 untuk berat badan 50 kg dan 70 kg [1,16].



**Gambar 4. Tegangan Langkah**

Persamaan tegangan langkah yang diizinkan untuk manusia dengan berat badan 50 kg dan 70 kg diberikan sebagai berikut [1]:

$$E_{s50} = [1000 + 6\rho_s C_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

$$E_{s70} = [1000 + 6\rho_s C_s] \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

dengan:

$E_s$  = tegangan langkah yang diizinkan (V)

4. Resistansi Pentanahan

Resistansi pentanahan (ground grid resistance) merupakan besarnya tahanan yang dimiliki sistem pentanahan dalam mengalirkan arus gangguan menuju tanah. Nilai resistansi pentanahan menjadi salah satu parameter penting dalam evaluasi sistem pentanahan karena memengaruhi besarnya Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage). Semakin kecil nilai resistansi pentanahan, semakin efektif sistem pentanahan dalam mengalirkan arus gangguan sehingga tingkat keselamatan personel dan keandalan peralatan dapat ditingkatkan [1,2,4,16]. Nilai resistansi pentanahan dihitung menggunakan persamaan yang mengacu pada IEEE Std 80-2013 sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (6) [1].

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (6)$$

dengan

$R_g$  = resistansi pentanahan ( $\Omega$ )

$L$  = total panjang konduktor grid (m)

$A$  = luas area grid ( $m^2$ )

$h$  = kedalaman penanaman konduktor (m)

5. Arus Grid Simetris

Arus grid simetris (symmetrical grid current) merupakan bagian dari arus gangguan satu fasa ke tanah yang mengalir melalui sistem pentanahan gardu induk menuju tanah. Besarnya arus grid dipengaruhi oleh nilai arus gangguan maksimum serta faktor pembagian arus (current division factor) yang menunjukkan proporsi arus gangguan yang dialirkan ke sistem pentanahan. Nilai arus grid simetris digunakan sebagai parameter dasar dalam perhitungan Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah, sehingga menjadi salah satu parameter penting dalam evaluasi keselamatan sistem pentanahan [1,2,4,16]. Arus grid simetris dihitung menggunakan Persamaan (7) sesuai dengan IEEE Std 80-2013 [1].

$$I_g = S_f I_f \quad (7)$$

dengan

$I_g$  = arus grid simetris (A)

$S_f$  = faktor pembagian arus

$I_f$  = arus gangguan tanah maksimum (A)

6. Arus Grid Maksimum

Arus grid maksimum (maximum grid current) merupakan arus rancangan yang digunakan dalam evaluasi sistem pentanahan pada kondisi gangguan. Parameter ini digunakan sebagai dasar dalam perhitungan Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage) sesuai dengan ketentuan IEEE Std 80-2013 [1,2,4,16]. Arus grid maksimum dihitung menggunakan Persamaan (8) berdasarkan IEEE Std 80-2013 [1].

$$I_G = C_p D_f I_g \quad (8)$$

dengan

$I_G$  = arus grid maksimum (A)

$C_p$  = corrective projection factor

$D_f$  = decrement factor

$I_g$  = arus grid simetris (A)

7. Ground Potential Rise (GPR)

Ground Potential Rise (GPR) merupakan kenaikan potensial pada sistem pentanahan terhadap tanah referensi akibat adanya arus gangguan yang mengalir melalui sistem pentanahan menuju bumi. Nilai GPR digunakan untuk mengevaluasi tingkat keamanan sistem pentanahan, terutama dalam menentukan kemungkinan munculnya tegangan sentuh dan tegangan langkah pada area gardu induk [1,2,4,16]. Besarnya nilai GPR dapat dihitung menggunakan Persamaan (9) [1].

$$GPR = I_g R_g \quad (9)$$



dengan

$GPR$  = Ground Potential Rise (V)

$I_g$  = arus grid simetris (A)

$R_g$  = resistansi pentanahan ( $\Omega$ )

### Simulasi Sistem Pentanahan Menggunakan ETAP

Simulasi sistem pentanahan dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP Ground Grid System untuk memverifikasi hasil perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013. Model sistem pentanahan dibangun dengan memasukkan data konfigurasi grid, jumlah dan panjang elektroda batang (ground rod), luas area gardu, kedalaman penanaman konduktor, resistivitas tanah, serta arus gangguan tanah. Selanjutnya dilakukan proses simulasi untuk memperoleh nilai resistansi pentanahan (ground resistance), arus grid (grid current), Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage) [1,2,4]. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013 untuk mengevaluasi kesesuaian parameter keselamatan sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV.

### Analisis Data

Hasil perhitungan manual dan simulasi ETAP dianalisis secara komparatif untuk mengetahui tingkat kesesuaian setiap parameter sistem pentanahan. Analisis dilakukan terhadap nilai resistansi pentanahan, arus grid, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Selanjutnya, seluruh hasil dibandingkan dengan batas keselamatan yang ditetapkan dalam IEEE Std 80-2013 sehingga dapat ditentukan apakah sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV telah memenuhi persyaratan keselamatan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Data Sistem Pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV

Sistem pentanahan pada Gardu Induk New Jakabaring 150 kV menggunakan konfigurasi Grid-Rod, yaitu kombinasi konduktor grid yang dipasang secara horizontal dan elektroda batang yang ditanam secara vertikal. Konfigurasi ini digunakan untuk memperoleh distribusi arus gangguan yang lebih merata serta menurunkan nilai tahanan pentanahan pada area gardu induk. Data teknis sistem pentanahan yang digunakan dalam simulasi ETAP dan analisis berdasarkan IEEE Std 80-2013 ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Data Sistem Pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV**

| Parameter                                 | Nilai                       |
|-------------------------------------------|-----------------------------|
| Jenis elektroda rod                       | Tembaga                     |
| Diameter rod                              | 17,3 mm                     |
| Panjang rod                               | 4 m                         |
| Jumlah rod                                | 4 batang                    |
| Ukuran konduktor grid                     | $1 \times 150 \text{ mm}^2$ |
| Kedalaman penanaman grid                  | 0,5 m                       |
| Resistivitas tanah ( $\rho$ )             | 100 $\Omega\text{m}$        |
| Resistivitas permukaan tanah ( $\rho_s$ ) | 2.500 $\Omega\text{m}$      |
| Ketebalan lapisan batu pecah ( $h_s$ )    | 0,2 m                       |
| Faktor pembagi arus ( $S_f$ )             | 0,6                         |
| Durasi gangguan ( $t$ )                   | 1 detik                     |
| Arus gangguan tanah ( $I_f$ )             | 10.000 A                    |
| Panjang grid                              | 104 m                       |
| Lebar grid                                | 72 m                        |
| Jarak konduktor arah X                    | 8 m                         |
| Jarak konduktor arah Y                    | 6 m                         |

Berdasarkan data tersebut, dilakukan pemodelan sistem pentanahan pada software ETAP untuk memperoleh parameter kelistrikan sistem pentanahan, kemudian hasil simulasi dibandingkan dengan batas aman yang ditentukan dalam IEEE Std 80-2013, meliputi nilai Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage).

### Perhitungan Parameter Sistem Pentanahan Berdasarkan IEEE Std 80-2013

#### 1. Faktor Reduksi Permukaan Tanah

Faktor reduksi lapisan permukaan dihitung berdasarkan parameter resistivitas tanah, resistivitas lapisan permukaan, dan ketebalan lapisan permukaan sesuai IEEE Std 80-2013, yaitu:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{100}{2.500}\right)}{2 \times 0,2 + 0,09} = 0,82$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut diperoleh nilai faktor reduksi lapisan permukaan sebesar 0,82. Nilai ini selanjutnya digunakan sebagai faktor koreksi dalam perhitungan batas aman tegangan sentuh dan tegangan langkah pada sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV.

#### 2. Tegangan Sentuh yang Diizinkan

Berdasarkan IEEE Std 80-2013, nilai tegangan sentuh yang diizinkan dipengaruhi oleh berat badan manusia, resistivitas lapisan permukaan, faktor reduksi permukaan, dan durasi waktu gangguan. Untuk berat manusia 50 kg, tegangan sentuh yang diizinkan adalah:

$$E_{t50} = [1000 + 1,5\rho_s C_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}} = [1000 + 1,5 \times 2.500 \times 0,82] \frac{0,116}{\sqrt{1}} = 472,7 \text{ V}$$

Sedangkan untuk berat manusia 70 kg, tegangan sentuh yang diizinkan adalah:

$$E_{t70} = [1000 + 1,5\rho_s C_s] \frac{0,157}{\sqrt{t}} = [1000 + 1,5 \times 2.500 \times 0,82] \frac{0,157}{\sqrt{1}} = 639,7 \text{ V}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai tegangan sentuh maksimum yang diizinkan adalah 472,7 V untuk manusia dengan berat 50 kg dan 639,7 V untuk manusia dengan berat 70 kg.

#### 3. Tegangan Langkah yang Diizinkan

Berdasarkan IEEE Std 80-2013, nilai tegangan langkah yang diizinkan dipengaruhi oleh berat badan manusia, resistivitas lapisan permukaan, faktor reduksi permukaan, dan durasi waktu gangguan. Untuk berat manusia 50 kg, tegangan langkah yang diizinkan adalah:

$$E_{s50} = [1000 + 6\rho_s C_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}} = [1000 + 6 \times 2.500 \times 0,82] \frac{0,116}{\sqrt{1}} = 1.542,8 \text{ V}$$

Sedangkan untuk berat manusia 70 kg, tegangan langkah yang diizinkan adalah:

$$E_{s70} = [1000 + 6\rho_s C_s] \frac{0,157}{\sqrt{t}} = [1000 + 6 \times 2.500 \times 0,82] \frac{0,157}{\sqrt{1}} = 2.088,1 \text{ V}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai tegangan langkah maksimum yang diizinkan adalah 1.542,8 V untuk manusia dengan berat 50 kg dan 2.088,1 V untuk manusia dengan berat 70 kg.

#### 4. Resistansi Pentanahan

Resistansi pentanahan merupakan salah satu parameter penting dalam evaluasi sistem pentanahan karena berpengaruh terhadap besarnya kenaikan potensial tanah. Sebelum melakukan perhitungan resistansi pentanahan, terlebih dahulu ditentukan panjang total konduktor pentanahan ( $L$ ) dan luas area sistem pentanahan ( $A$ ) pada Gardu Induk New Jakabaring 150 kV. Berdasarkan kondisi tanah di sekitar gardu induk, nilai resistivitas tanah yang digunakan adalah sebesar:  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ .

Panjang total konduktor sistem pentanahan diperoleh dari jumlah panjang konduktor grid horizontal ( $L_c$ ) dan panjang elektroda rod vertikal ( $L_r$ ), yaitu:  $L = L_c + L_r$

Jumlah konduktor grid pada arah sumbu X dan Y dihitung sebagai berikut:

$$n = \frac{L_2}{D_2} + 1 = \frac{104}{8} + 1 = 14 \quad \text{dan} \quad m = \frac{L_1}{D_1} + 1 = \frac{72}{6} + 1 = 13$$

Sehingga panjang total konduktor grid adalah:  $L_c = (72 \times 14) + (104 \times 13) = 2.360 \text{ m}$

Panjang total elektroda rod:  $L_r = 4 \times 4 = 16 \text{ m}$

Dengan demikian, total panjang konduktor pentanahan adalah:  $L = 2360 + 16 = 2376 \text{ m}$

Sedangkan luas area sistem pentanahan:  $A = 104 \times 72 = 7.488 \text{ m}^2$

Nilai resistansi pentanahan dihitung berdasarkan persamaan (6) yaitu:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 100 \left[ \frac{1}{2.376} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 7.488}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,5\sqrt{\frac{20}{7.488}}} \right) \right] = 0,55 \Omega$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, nilai resistansi pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV sebesar 0,55  $\Omega$ .

#### 5. Arus Grid Simetris

Arus grid simetris merupakan arus gangguan yang masuk ke sistem pentanahan setelah mempertimbangkan faktor pembagian arus (current division factor). Nilai arus grid simetris dihitung menggunakan Persamaan (7) yaitu:

$$I_g = S_f I_f = 0,6 \times 10.000 = 6.000 \text{ A}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai arus grid simetris sebesar 6.000 A.

#### 6. Arus Grid Maksimum

Arus grid maksimum merupakan arus yang digunakan dalam evaluasi keselamatan sistem pentanahan karena telah mempertimbangkan faktor koreksi akibat kondisi asimetris dan pengembangan sistem. Nilai arus grid maksimum dihitung menggunakan Persamaan (8) yaitu:

$$I_G = C_p D_f I_g = 1 \times 1 \times 6.000 = 6.000 \text{ A}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai arus grid maksimum sama dengan arus grid simetris karena faktor koreksi yang digunakan bernilai satu.

#### 7. Ground Potential Rise

Ground Potential Rise (GPR) merupakan kenaikan potensial sistem pentanahan terhadap tanah referensi akibat aliran arus gangguan menuju bumi. Nilai GPR dihitung menggunakan arus grid maksimum dan resistansi pentanahan yaitu:

$$GPR = I_g R_g = 6.000 \times 0,55 = 3.300 \text{ V}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai GPR sebesar 3.300 V.

### Rekapitulasi Hasil Perhitungan Manual

Hasil perhitungan parameter sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV secara manual ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Hasil Perhitungan Manual Sistem Pentanahan**

| Parameter                               | Hasil         |
|-----------------------------------------|---------------|
| Tegangan sentuh yang diizinkan (50 kg)  | 472,7 V       |
| Tegangan sentuh yang diizinkan (70 kg)  | 639,7 V       |
| Tegangan langkah yang diizinkan (50 kg) | 1.542,8 V     |
| Tegangan langkah yang diizinkan (70 kg) | 2.088,1 V     |
| Resistansi pentanahan ( $R_g$ )         | 0,55 $\Omega$ |
| Arus grid simetris ( $I_g$ )            | 6.000 A       |
| Arus grid maksimum ( $I_G$ )            | 6.000 A       |
| Ground Potential Rise ( $GPR$ )         | 3.300 V       |

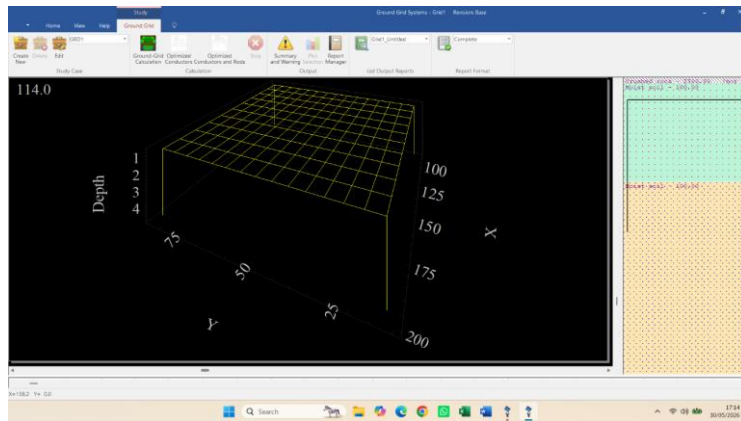
Berdasarkan hasil perhitungan manual pada Tabel 2, sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV memiliki nilai resistansi pentanahan sebesar 0,55  $\Omega$ . Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki impedansi pentanahan yang rendah sehingga mampu menyediakan jalur arus gangguan menuju tanah secara efektif. Selanjutnya, nilai GPR, tegangan sentuh, dan tegangan langkah hasil perhitungan manual akan dibandingkan dengan hasil simulasi ETAP untuk mengevaluasi tingkat keamanan sistem pentanahan berdasarkan IEEE Std 80-2013.

### Simulasi Sistem Pentanahan Menggunakan ETAP

Sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV dimodelkan menggunakan perangkat lunak ETAP dengan konfigurasi grid-rod berbentuk persegi panjang. Sistem ini terdiri dari konduktor grid horizontal dan elektroda rod vertikal. Konduktor grid berfungsi untuk mendistribusikan arus gangguan pada area switchyard, sedangkan elektroda rod digunakan untuk meningkatkan kemampuan pelepasan arus gangguan ke tanah.

Pemodelan dilakukan berdasarkan kondisi eksisting sistem pentanahan dengan memasukkan parameter geometri grid, karakteristik konduktor, kondisi tanah, serta parameter gangguan sesuai dengan data penelitian. Parameter yang digunakan meliputi ukuran grid sebesar 104 m  $\times$  72 m, kedalaman penanaman konduktor 0,5 m, jarak antar konduktor arah X sebesar 8 m, jarak antar konduktor arah Y sebesar 6 m, empat buah elektroda rod dengan panjang masing-masing 4 m, resistivitas tanah sebesar 100

$\Omega\text{m}$ , resistivitas lapisan permukaan batu pecah sebesar  $2500 \Omega\text{m}$ , ketebalan lapisan permukaan  $0,2 \text{ m}$ , arus gangguan sebesar  $10.000 \text{ A}$ , faktor pembagi arus sebesar  $0,6$ , dan waktu gangguan selama  $1 \text{ detik}$ . Konfigurasi sistem pentanahan grid-rod pada software ETAP ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 5. Konfigurasi Sistem Pentanahan Grid-Rod Gardu Induk New Jakabaring 150 kV**

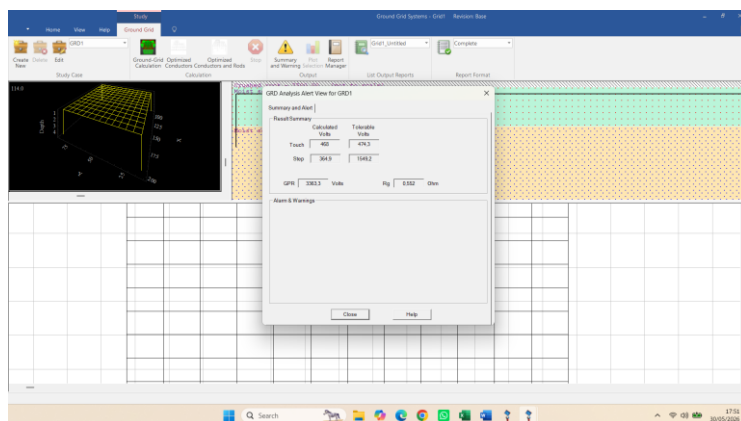
Berdasarkan konfigurasi tersebut, simulasi dilakukan untuk memperoleh parameter keselamatan sistem pentanahan yang meliputi resistansi pentanahan ( $R_g$ ), Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah. Hasil simulasi ETAP kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013.

#### Hasil Simulasi Sistem Pentanahan Menggunakan ETAP

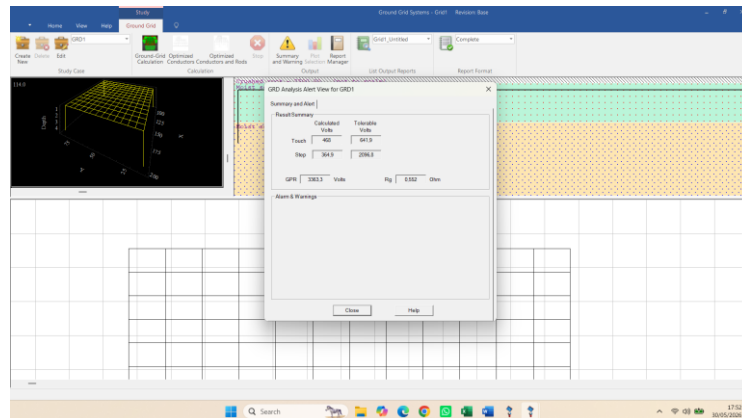
Hasil simulasi menggunakan ETAP menunjukkan karakteristik sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV dengan nilai resistansi pentanahan sebesar  $0,552 \Omega$  dan Ground Potential Rise (GPR) sebesar  $3.363,3 \text{ V}$ . Selain itu, diperoleh nilai tegangan sentuh aktual sebesar  $468 \text{ V}$  dan tegangan langkah aktual sebesar  $364,9 \text{ V}$ . Hasil simulasi dibandingkan dengan batas tegangan yang diizinkan berdasarkan IEEE Std 80-2013 seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3. Hasil Simulasi Sistem Pentanahan Menggunakan ETAP**

| Parameter                       | Berat 50 kg    | Berat 70 kg |
|---------------------------------|----------------|-------------|
| Tegangan sentuh yang diizinkan  | 474,9 V        | 641,9 V     |
| Tegangan langkah yang diizinkan | 1.549,2 V      | 2.096,8 V   |
| Tegangan sentuh aktual          | 468 V          | 468 V       |
| Tegangan langkah aktual         | 364,9 V        | 364,9 V     |
| Resistansi pentanahan ( $R_g$ ) | 0,552 $\Omega$ |             |
| Ground Potential Rise (GPR)     | 3.363,3 V      |             |



**Gambar 6. Tampilan Simulasi Sistem Pentanahan Menggunakan ETAP untuk Berat 50 kg**



**Gambar 7. Tampilan Simulasi Sistem Pentanahan Menggunakan ETAP untuk Berat 70 kg**

Berdasarkan Tabel 3, nilai tegangan sentuh aktual sebesar 468 V masih berada di bawah tegangan sentuh yang diizinkan, yaitu 474,9 V untuk manusia dengan berat 50 kg dan 641,9 V untuk berat 70 kg. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan masih memenuhi kriteria keselamatan berdasarkan IEEE Std 80-2013.

Nilai tegangan langkah aktual sebesar 364,9 V juga berada jauh di bawah batas yang diizinkan, yaitu 1549,2 V untuk berat 50 kg dan 2096,8 V untuk berat 70 kg. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa distribusi potensial pada permukaan tanah masih terkendali sehingga risiko akibat perbedaan potensial antar titik pijak dapat diminimalkan.

#### Perbandingan Hasil Perhitungan Manual dan Simulasi ETAP

Perbandingan antara hasil perhitungan manual dan simulasi ETAP dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian hasil analisis berdasarkan persamaan IEEE Std 80-2013 dengan hasil pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak. Perbandingan parameter utama sistem pentanahan ditunjukkan pada Tabel 4.

**Tabel 4. Perbandingan Hasil Perhitungan Manual dan Simulasi ETAP**

| Parameter                               | Perhitungan Manual | Simulasi ETAP  | Selisih        |
|-----------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Resistansi pentanahan ( $R_g$ )         | 0,55 $\Omega$      | 0,552 $\Omega$ | 0,002 $\Omega$ |
| Ground Potential Rise ( $GPR$ )         | 3.300 V            | 3.363,3 V      | 63,3 V         |
| Tegangan sentuh yang diizinkan (50 kg)  | 472,7 V            | 474,9 V        | 2,2 V          |
| Tegangan sentuh yang diizinkan (70 kg)  | 639,7 V            | 641,9 V        | 2,2 V          |
| Tegangan langkah yang diizinkan (50 kg) | 1.542,8 V          | 1.549,2 V      | 6,4 V          |
| Tegangan langkah yang diizinkan (70 kg) | 2.088,1 V          | 2.096,8 V      | 8,7 V          |

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai resistansi pentanahan hasil simulasi ETAP memiliki selisih yang sangat kecil terhadap hasil perhitungan manual, yaitu sebesar 0,002  $\Omega$ . Hal ini menunjukkan bahwa model sistem pentanahan yang digunakan pada ETAP telah sesuai dengan parameter perhitungan teoritis.

Nilai GPR hasil simulasi sebesar 3363,3 V memiliki perbedaan sebesar 63,3 V dibandingkan hasil manual sebesar 3300 V. Perbedaan tersebut disebabkan oleh metode perhitungan yang berbeda, dimana perhitungan manual menggunakan pendekatan persamaan analitis, sedangkan ETAP melakukan pemodelan berdasarkan konfigurasi geometris sistem pentanahan.

Meskipun terdapat perbedaan nilai, kedua metode menunjukkan kecenderungan hasil yang sama, yaitu sistem dengan resistansi pentanahan rendah menghasilkan nilai GPR yang lebih kecil pada arus gangguan yang sama.

#### Analisis Sistem Pentanahan Berdasarkan IEEE Std 80-2013

Hasil perhitungan manual dan simulasi menggunakan ETAP menunjukkan bahwa sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV memenuhi persyaratan keselamatan yang ditetapkan dalam IEEE Std

80-2013. Seluruh parameter utama, meliputi resistansi pentanahan ( $R_g$ ), Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh (touch voltage), dan tegangan langkah (step voltage), berada dalam batas yang diizinkan sehingga sistem pentanahan mampu mengalirkan arus gangguan ke tanah secara aman serta meminimalkan risiko terhadap personel maupun peralatan gardu induk.

Perbandingan hasil perhitungan manual dan simulasi ETAP menunjukkan adanya selisih yang sangat kecil pada setiap parameter. Nilai resistansi pentanahan hasil perhitungan manual sebesar  $0,55 \Omega$ , sedangkan hasil simulasi ETAP sebesar  $0,552 \Omega$ , dengan selisih hanya sekitar  $0,36\%$ . Perbedaan tersebut disebabkan oleh metode komputasi yang digunakan ETAP. Perhitungan manual menggunakan penyederhanaan persamaan berdasarkan IEEE Std 80-2013 dengan beberapa asumsi ideal, sedangkan ETAP melakukan proses komputasi numerik menggunakan model jaringan pentanahan secara menyeluruh, termasuk pembulatan numerik (numerical precision) dan representasi geometri grid yang lebih rinci. Oleh karena itu, perbedaan kecil tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima dan menunjukkan bahwa hasil simulasi mampu memverifikasi hasil perhitungan manual.

Nilai Ground Potential Rise (GPR) hasil perhitungan manual sebesar  $3.300 \text{ V}$ , sedangkan hasil simulasi ETAP sebesar  $3.363,3 \text{ V}$ , dengan selisih sekitar  $63,3 \text{ V}$  atau  $1,92\%$ . Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh perbedaan nilai resistansi pentanahan hasil simulasi serta proses komputasi numerik ETAP yang memodelkan distribusi arus gangguan pada jaringan grid secara lebih rinci dibandingkan pendekatan analitis pada perhitungan manual. Meskipun nilai GPR relatif tinggi, kondisi tersebut masih memenuhi persyaratan keselamatan IEEE Std 80-2013 karena seluruh struktur logam pada gardu induk dihubungkan melalui sistem pentanahan yang bersifat ekuipotensial, sehingga tidak menimbulkan beda potensial berbahaya bagi personel maupun peralatan ketika terjadi gangguan ke tanah.

Parameter keselamatan yang paling penting dalam evaluasi sistem pentanahan adalah tegangan sentuh dan tegangan langkah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan sentuh aktual sebesar  $468 \text{ V}$ , sedangkan batas tegangan sentuh yang diizinkan menurut IEEE Std 80-2013 untuk kondisi berat badan  $50 \text{ kg}$  sebesar  $474,9 \text{ V}$ . Dengan demikian masih terdapat margin keselamatan sekitar  $6,9 \text{ V}$ , yang menunjukkan bahwa sistem masih berada pada kondisi aman. Nilai tegangan langkah aktual sebesar  $364,9 \text{ V}$  juga jauh lebih kecil dibandingkan batas yang diizinkan sehingga menunjukkan bahwa konfigurasi grid-rod mampu menyebarkan arus gangguan secara merata dan mengurangi gradien potensial pada permukaan tanah. Nilai tegangan sentuh yang lebih mendekati batas dibandingkan tegangan langkah menunjukkan bahwa tegangan sentuh merupakan parameter yang paling kritis dalam evaluasi sistem pentanahan, sehingga perlu mendapat perhatian apabila terjadi perubahan resistivitas tanah, peningkatan arus gangguan, maupun degradasi lapisan batu pecah di area gardu induk.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Dladla et al. [2], yang menunjukkan bahwa simulasi ETAP mampu menghasilkan evaluasi sistem pentanahan yang konsisten dengan metode perhitungan berdasarkan IEEE Std 80-2013. Kesamaan tersebut menunjukkan bahwa ETAP merupakan perangkat lunak yang layak digunakan sebagai alat verifikasi dalam analisis sistem pentanahan gardu induk. Selain itu, hasil penelitian ini juga mendukung penelitian Saltos-González et al. [4], yang menyatakan bahwa konfigurasi grid yang dirancang sesuai standar mampu menghasilkan distribusi potensial tanah yang lebih aman dan memenuhi batas keselamatan.

Dari sisi karakteristik tanah, hasil penelitian ini juga konsisten dengan penelitian Fitriani et al. [6] dan Permal et al. [8,9], yang menjelaskan bahwa resistivitas tanah dan konfigurasi sistem pentanahan merupakan faktor utama yang memengaruhi nilai resistansi pentanahan, tegangan sentuh, serta tegangan langkah. Pada Gardu Induk New Jakabaring  $150 \text{ kV}$ , kombinasi konduktor grid dan elektroda batang (grid-rod) menghasilkan resistansi pentanahan yang rendah sehingga distribusi arus gangguan menjadi lebih merata dan parameter keselamatan tetap berada dalam batas yang dipersyaratkan IEEE Std 80-2013.

Dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya melakukan analisis menggunakan simulasi atau perhitungan teoritis secara terpisah [12,13,15], penelitian ini memberikan verifikasi melalui dua pendekatan, yaitu perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013 dan simulasi ETAP pada objek penelitian yang sama. Kedekatan hasil kedua metode menunjukkan bahwa simulasi ETAP memiliki tingkat akurasi yang tinggi terhadap metode perhitungan standar sehingga dapat digunakan sebagai alat validasi dalam evaluasi sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring  $150 \text{ kV}$ .

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi sistem pentanahan grid-rod yang diterapkan pada Gardu Induk New Jakabaring  $150 \text{ kV}$  telah memenuhi persyaratan keselamatan IEEE Std 80-2013. Selisih yang sangat kecil antara hasil perhitungan manual dan simulasi ETAP membuktikan

bahwa kedua metode memiliki tingkat konsistensi yang tinggi, sehingga simulasi ETAP dapat dimanfaatkan sebagai metode evaluasi maupun verifikasi dalam analisis sistem pentanahan gardu induk.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan manual mengacu pada IEEE Std 80-2013 dan simulasi menggunakan software ETAP, sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV memenuhi persyaratan keselamatan yang ditetapkan dalam standar. Nilai resistansi pentanahan yang diperoleh berada di bawah 1  $\Omega$ , sedangkan nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah aktual masih berada di bawah batas yang diizinkan. Perbandingan hasil perhitungan manual dan simulasi ETAP menunjukkan perbedaan yang sangat kecil pada setiap parameter, sehingga hasil simulasi dapat memverifikasi hasil perhitungan manual dengan tingkat kesesuaian yang baik. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam bentuk verifikasi kinerja sistem pentanahan Gardu Induk New Jakabaring 150 kV melalui dua pendekatan, yaitu perhitungan manual berdasarkan IEEE Std 80-2013 dan simulasi menggunakan ETAP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ETAP dapat digunakan sebagai alat bantu yang andal untuk mengevaluasi parameter keselamatan sistem pentanahan, meliputi resistansi pentanahan, Ground Potential Rise (GPR), tegangan sentuh, dan tegangan langkah, sehingga dapat mendukung proses evaluasi maupun verifikasi desain sistem pentanahan pada gardu induk. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan analisis dengan mempertimbangkan model tanah multilapis, variasi kondisi resistivitas tanah, serta analisis kondisi transien akibat sambaran petir atau gangguan hubung singkat. Selain itu, validasi hasil simulasi melalui pengukuran lapangan pada sistem pentanahan gardu induk dapat dilakukan untuk memperoleh hasil evaluasi yang lebih komprehensif.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Committee, I. Power, and E. Society, *IEEE Std 80<sup>TM</sup>-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. 2015.
- [2] V. M. N. Dladla, A. F. Nnachi, and R. P. Tshubwana, "Design, Modeling, and Analysis of IEEE Std 80 Earth Grid Design Refinement Methods Using ETAP," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 13, p. 7491, 2026, doi: 10.3390/app13137491.
- [3] V. M. N. Dladla, A. F. Nnachi, and R. P. Tshubwana, "Analysis of Design Parameters on Substation Earth Grid Safety Limits," *Sci. Publ. Gr.*, vol. 10, no. 2, pp. 61–72, 2022, doi: 10.11648/j.cssp.20211002.14.
- [4] J. Saltos-González, W. Saltos-Aráuz, and H. A. Pico-Mera, "Optimization design of ground grid mesh of 69/13,8 KV substation using ETAP," *Sapienza Int. J. Interdiscip. Stud.*, vol. 4, no. 3, pp. e23038–e23038, 2023, doi: 10.51798/sijis.v4i3.693.
- [5] S. Maryati and A. Azis, "Analisa Tahanan Pentanahan Gardu Distribusi pada Penyulang Tarakan PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Sukarami," *Tek. J. Tek.*, vol. 11, no. 1, pp. 37–48, 2024, doi: 10.35449/teknika.v11i1.289.
- [6] A. Fitriani, J. Panjaitan, and S. A. Syahputra, "The Effect of Soil Type on Touch Voltage and Step Voltage in the Grid Grounding System," *ELKHA J. Tek. Elektro*, vol. 16, no. 1, pp. 56–62, 2024, doi: 10.26418/elkha.v16i1.78396.
- [7] J. Panjaitan, A. Fitriani, J. Hidayat, A. Pakpahan, M. Muchlisin, and R. Sirait, "Design Of A Main Substation Grounding System Based On Variations In Area and Number Of Electrodes," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 206–211, 2024, doi: 10.37905/jjee.v6i2.25224.
- [8] N. Permal, M. Osman, A. M. Ariffin, and M. Z. A. A. Kadir, "Effect of Non-Homogeneous Soil Characteristics on Substation Grounding-Grid Performances: A Review," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 16, p. 7468, 2021, doi: 10.3390/app11167468.
- [9] N. Permal, M. Osman, A. M. Ariffin, and M. Z. A. A. Kadir, "The Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to the Grid Safety Threshold Parameters," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37497–37509, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063018.
- [10] A. R. J. de Araújo *et al.*, "Computation of ground potential rise and grounding impedance of simple arrangement of electrodes buried in frequency-dependent stratified soil," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 198, p. 107364, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107364.
- [11] Z. A. Malek, M. S. A. Yaman, and M. Adnan, "Effects of soil profile on the transient performance of substation grounding system," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 870–877, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v20.i2.pp870-877.
- [12] A. D. Cahyono and E. Sumarno, "ANALYSIS OF THE GROUNDING SYSTEM AT THE 150 KV

- SERPONG SUBSTATION BASED ON THE IEEE 80-2013 STANDARD,” *JITET (Jurnal Inform. dan Tek. Elektro Ter.*, vol. 13, no. 3S1, pp. 1404–1415, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7828.
- [13] S. Hardi, R. Andira, I. Nisja, B. Octrialdi, and M. Pinem, “Economic Design of Substation Grounding Grid using ETAP Software: A Case Study of 2 x 500 MVA Galang Substation,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1811, no. 1, p. 012055, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1811/1/012055.
- [14] D. Romadani and I. Hajar, “Analisa Hasil Pengukuran Tahanan Pentanahan Pada Peralatan di Switchyard Gardu Induk Angke PT. PLN (Persero) UIT – JBB Duri Kosambi,” *J. Ilm. SUTET*, vol. 13, no. 1, pp. 35–47, 2023, doi: 10.33322/sutet.v13i1.1805.
- [15] D. J. Sinaga, “ANALISIS SISTEM PEMBUMIHAN GARDU INDUK DENGAN MENGGUNAKAN ETAP DAN MATLAB,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3, pp. 1118–1123, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.7167.
- [16] F. R. Pratiwi and A. Suryanto, “Analisis sistem grounding pada gardu induk 150KV Temanggung dengan simulasi software ETAP,” *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 5, no. 2, pp. 114–122, 2021, doi: 10.36277/jteuniba.v5i2.91.

