

ANALISIS SISTEM PENTANAHAN GARDU INDUK DENAI 150 KV MENGGUNAKAN SIMULASI ETAP

Julianda Akmal^{1*}, Rudi Salman²

^{1,2}Universitas Negeri Medan, Indonesia
email: juliandaakmaljulianda@gmail.com*

Abstrak

Sistem pentanahan merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menjamin keselamatan manusia serta melindungi peralatan dari arus gangguan tanah. Evaluasi sistem pentanahan diperlukan untuk memastikan tegangan sentuh dan tegangan langkah berada dalam batas aman sesuai standar. Gardu Induk Denai 150 kV menjadi objek penelitian karena memiliki potensi kenaikan tegangan tanah yang signifikan saat terjadi gangguan. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pemodelan sistem pentanahan berdasarkan data aktual gardu induk. Simulasi dilakukan menggunakan *software* ETAP 19.0.1 dengan mengacu pada standar IEEE Std 80-2000/2013. Parameter yang dianalisis meliputi resistivitas tanah, konfigurasi *grid*, jumlah dan panjang *ground rod*, serta arus gangguan satu fasa ke tanah. Hasil simulasi menunjukkan arus gangguan tanah sebesar 40 kA menghasilkan nilai *Ground Potential Rise* yang signifikan pada sistem eksisting. Nilai tahanan pentanahan sebesar 0,8 Ω masih berada di bawah batas rekomendasi, namun distribusi tegangan sentuh dan langkah di beberapa titik mendekati batas aman. Analisis distribusi tegangan menunjukkan adanya area berpotensi bahaya yang tidak terlihat dari nilai tahanan total. Rekonfigurasi sistem dilakukan melalui penambahan *ground rod* dan optimasi konfigurasi *grid*. Setelah rekonfigurasi, nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah mengalami penurunan yang signifikan. Seluruh parameter hasil simulasi memenuhi batas keamanan sesuai standar IEEE Std 80. Simulasi juga membantu mengidentifikasi *hotspot* yang berpotensi membahayakan operator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan simulasi efektif dalam evaluasi sistem pentanahan gardu induk. Penelitian ini menegaskan pentingnya evaluasi berbasis simulasi untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem tenaga listrik. Implementasi rekonfigurasi terbukti mampu meningkatkan tingkat keamanan sistem pentanahan.

Kata Kunci: Sistem Pentanahan, Tegangan Sentuh, Tegangan Langkah, *Ground Potential Rise* (GPR), ETAP 19.0.1, IEEE

Abstract

The grounding system is an important part of the electric power system that functions to ensure human safety and protect equipment from ground fault currents. Evaluation of the grounding system is needed to ensure that the touch voltage and step voltage are within the safe limits according to standards. The Denai 150 kV Substation is the object of research because it has the potential for a significant increase in ground voltage when a fault occurs. This study uses a quantitative approach through grounding system modeling based on actual substation data.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Simulations are carried out using ETAP 19.0.1 software with reference to the IEEE Std 80-2000/2013 standard. The parameters described include soil resistivity, grid configuration, number and length of ground rods, and single-phase ground fault current. The simulation results show that a ground fault current of 40 kA produces a significant Ground Potential Rise value in the existing system. The ground resistance value of 0.8 Ω is still below the recommended limit, but the distribution of touch voltages and step voltages at several points is close to the safe limit. Analysis of the voltage distribution indicates the presence of potentially dangerous areas that are not visible from the total resistance value. System reconfiguration is carried out by adding ground rods and optimizing the grid configuration. After reconfiguration, the touch voltage and step voltage values decreased significantly. All simulation parameters met the safety limits according to the IEEE Std 80 standard. The simulation also helped identify hotspots that could potentially harm operators. The results showed that the simulation approach was effective in evaluating the substation grounding system. This study emphasized the importance of simulation-based evaluation to improve the safety and efficiency of the electric power system. The implementation of reconfiguration was proven to be able to improve the safety level of the grounding system.

Keywords: Grounding System, Touch Voltage, Step Voltage, Ground Potential Rise (GPR), ETAP 19.0.1, IEEE

I. LATAR BELAKANG

Sistem pentanahan memegang peran esensial dalam menjamin keselamatan manusia serta perlindungan peralatan pada instalasi tenaga listrik, khususnya pada gardu induk bertegangan tinggi seperti 150 kV. Sistem pentanahan berfungsi sebagai jalur impedansi rendah untuk menyalurkan arus gangguan ke tanah secara aman dan membatasi tegangan sentuh serta tegangan langkah pada batas yang masih dapat diterima oleh tubuh manusia sesuai standar keselamatan internasional. Sistem pentanahan bertujuan untuk membatasi tegangan antara peralatan, antar tanah dan meratakan gradien tegangan yang timbul di permukaan tanah akibat arus gangguan pada gardu induk [1].

Pada gardu induk, kenaikan tegangan tanah atau *Ground Potential Rise* (GPR) menjadi parameter penting karena berkaitan langsung dengan risiko keselamatan operator. Sistem pentanahan gardu induk umumnya menggunakan konfigurasi *grid* atau *mesh* yang dikombinasikan dengan elektroda *rod* untuk memperbaiki distribusi potensial tanah serta mengendalikan tegangan langkah dan tegangan sentuh saat terjadi gangguan [2]. Namun, penelitian menunjukkan bahwa karakteristik tanah, terutama nilai resistivitas tanah, merupakan parameter utama dalam desain sistem pentanahan karena resistivitas yang tinggi dapat meningkatkan tegangan sentuh dan tegangan langkah sehingga distribusi tegangan di permukaan tanah menjadi kurang merata dan berpotensi menimbulkan kondisi berbahaya [3].

Hasil observasi awal pada Gardu Induk Denai 150 kV menunjukkan bahwa sistem pentanahan eksisting menggunakan konfigurasi *grid* dengan tambahan *ground rod* dan memiliki nilai tahanan pentanahan sebesar 0,8 Ω , yang masih berada di bawah batas rekomendasi standar IEEE (<1 Ω). Meskipun demikian, kondisi tanah dominan berupa batu koral dengan resistivitas relatif tinggi berpotensi meningkatkan nilai tegangan sentuh dan

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

tegangan langkah pada area tertentu. Arus gangguan fasa ke tanah *fault current* yang mengalir melalui sistem pentanahan menghasilkan GPR yang dapat meningkatkan tegangan permukaan tanah dan menyebabkan potensi bahaya pada peralatan atau manusia di dekatnya [4].

Permasalahan utama yang menjadi gap penelitian adalah belum adanya analisis komprehensif berbasis simulasi terhadap distribusi tegangan sentuh dan tegangan langkah pada sistem pentanahan eksisting. Data lapangan seperti resistivitas tanah, arus gangguan, dan jumlah elektroda memang tersedia, namun data tersebut hanya menggambarkan kondisi global dan belum mampu menunjukkan perilaku tegangan pada setiap titik *grid*. Akibatnya, potensi area berbahaya (*hotspot*) tidak dapat diidentifikasi melalui perhitungan sederhana.

Pendekatan simulasi menjadi penting karena mampu memetakan distribusi tegangan secara numerik dan visual, menghitung GPR, serta mengevaluasi pengaruh parameter desain seperti konfigurasi *grid*, jumlah *rod*, kedalaman konduktor, dan variasi resistivitas tanah. Perhitungan manual desain *grounding* bersifat kompleks dan memakan waktu sehingga berbagai perangkat lunak seperti ESGSD, SES *AutoGrid* Pro, dan CDEGS banyak digunakan untuk menghasilkan desain *grid* serta meningkatkan keselamatan sistem [5].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi sistem pentanahan pada Gardu Induk Denai 150 kV menggunakan simulasi perangkat lunak ETAP 19.0.1 dengan mengacu pada standar IEEE Std 80. Data aktual hasil observasi digunakan sebagai *input* simulasi untuk memperoleh nilai tegangan sentuh, tegangan langkah, dan tahanan pentanahan secara lebih detail. Selain itu, Konfigurasi sistem pentanahan gardu induk dapat dimodelkan dalam berbagai bentuk seperti persegi panjang, *L-shaped*, dan *T-shaped* untuk mendapatkan nilai tahanan pentanahan yang lebih rendah. Variasi bentuk ini mempengaruhi nilai resistansi dan kinerja keamanan yang sesuai dengan standar IEEE Std. 80-2013 [6].

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam evaluasi sistem pentanahan gardu induk berbasis simulasi, khususnya dalam mengidentifikasi area berpotensi bahaya yang tidak terlihat dari nilai tahanan pentanahan total. Hasil penelitian juga diharapkan menjadi referensi dalam perancangan dan optimasi sistem pentanahan gardu induk untuk meningkatkan keselamatan operator dan keandalan sistem tenaga listrik.

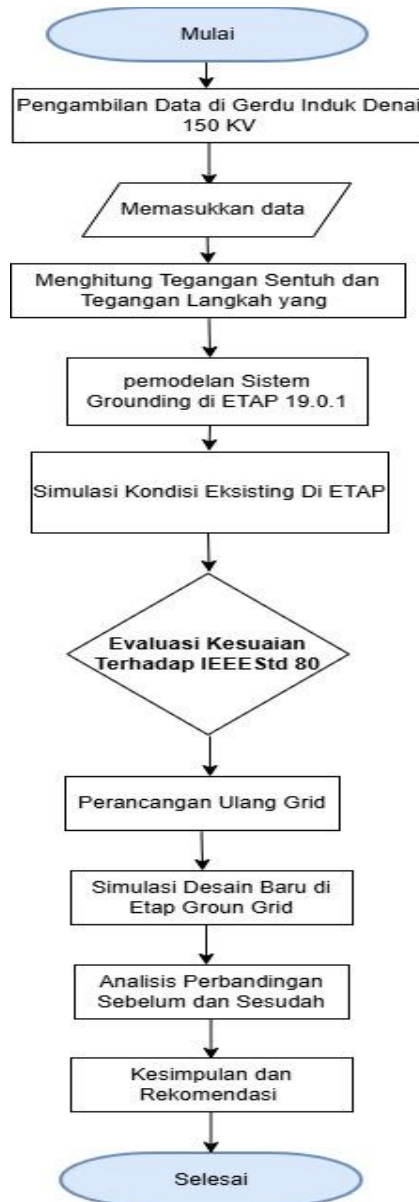
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi dan perhitungan analitis untuk menganalisis performa sistem pentanahan pada Gardu Induk Denai 150 kV serta melakukan rekonfigurasi desain guna memperoleh konfigurasi yang memenuhi standar keselamatan. Studi simulasi pada sistem *grounding* menggunakan perangkat lunak seperti CYMGround menunjukkan bahwa pemodelan ini dapat mengevaluasi distribusi potensial tanah, nilai tegangan sentuh, dan tegangan langkah dari variasi konfigurasi *grid* dan batang dengan akurasi dan realisme yang lebih tinggi dibandingkan perhitungan manual, sehingga membantu menentukan desain pentanahan yang aman [7]. Penelitian pada sistem pentanahan *grid-rod* pembangkit listrik menunjukkan bahwa kombinasi antara perhitungan analitis dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP menghasilkan nilai tahanan pentanahan, tegangan langkah, dan tegangan sentuh yang memenuhi kriteria aman menurut standar IEEE

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Std. 80-2000, sehingga memberikan gambaran evaluasi yang lebih akurat dibandingkan hanya menggunakan perhitungan manual [8].

Metode penelitian disusun dalam bentuk diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Aliran Penelitian

Secara umum tahapan penelitian meliputi pengumpulan data lapangan, pemodelan sistem pentanahan, simulasi kondisi eksisting, evaluasi terhadap standar keselamatan, rekonfigurasi desain, simulasi ulang, dan analisis perbandingan.

A. Pengumpulan Data

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data teknis sistem pentanahan Gardu Induk Denai melalui:

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

- a. Observasi lapangan untuk memperoleh konfigurasi *grid*, jumlah dan posisi *ground rod*, kedalaman penanaman, serta kondisi fisik konduktor.
- b. Pengukuran resistivitas tanah menggunakan metode Wenner.
- c. Dokumentasi teknis gardu induk meliputi arus gangguan, layout sistem pentanahan, dan spesifikasi konduktor.
- d. Wawancara dengan teknisi gardu untuk validasi konfigurasi aktual.
Data utama yang digunakan meliputi resistivitas tanah, arus gangguan, durasi gangguan, parameter permukaan, serta konfigurasi geometris *grid*.

B. Pemodelan Sistem Pentanahan

Data hasil pengumpulan kemudian digunakan untuk membangun model sistem pentanahan pada perangkat lunak simulasi. Parameter desain *grid* seperti jumlah horizontal dan vertikal konduktor, panjang batang *grounding*, dan kedalaman penanaman merupakan variabel utama yang dianalisis dalam optimasi kinerja sistem *grounding* untuk memastikan tegangan sentuh dan tegangan langkah berada di bawah batas toleransi standar keselamatan [9]. Standar IEEE Std 80-2013, *Guide for Safety in AC Substation Grounding*, memberikan panduan komprehensif untuk perancangan sistem pentanahan substansi yang aman dengan mempertimbangkan resistivitas tanah, tegangan sentuh, tegangan langkah, dan karakteristik tanah untuk membatasi gradien tegangan permukaan pada tingkat yang tidak berbahaya bagi manusia dan peralatan [10].

Selain itu, Dalam perancangan *grounding grid* pada sistem tenaga modern, *software* seperti ETAP telah digunakan untuk mensimulasikan *short-circuit* dan analisis distribusi tegangan, termasuk tegangan sentuh dan langkah, sehingga memfasilitasi evaluasi performa *grounding* secara numerik dan akurat [11]. Berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa Analisis distribusi potensial tanah di sekitar *grounding grid* dengan simulasi numerik memungkinkan pemetaan kontur tegangan yang menunjukkan area-area dengan gradien tinggi, atau “hotspots”, yang tidak dapat diidentifikasi hanya dari perhitungan tahanan pentanahan total, sehingga memberikan gambaran lebih lengkap untuk perbaikan desain *grounding* [12]

C. Simulasi Kondisi Eksisting

Simulasi dilakukan untuk memperoleh parameter utama sistem pentanahan, yaitu:

- a. Tahanan pentanahan total (R_g)
- b. *Ground Potential Rise* (GPR)
- c. Tegangan sentuh
- d. Tegangan langkah
- e. Distribusi potensial permukaan

Hasil simulasi digunakan untuk mengidentifikasi area berisiko (*hotspot*) dan menilai tingkat keselamatan sistem.

D. Evaluasi Berdasarkan Standar

Hasil simulasi dibandingkan dengan batas aman tegangan sentuh dan tegangan langkah berdasarkan standar keselamatan sistem pentanahan, khususnya standar IEEE Std. 80.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Kriteria evaluasi meliputi:

- a. Tegangan sentuh maksimum \leq tegangan sentuh yang diizinkan
- b. Tegangan langkah maksimum \leq tegangan langkah yang diizinkan
- c. Nilai tahanan pentanahan berada dalam batas rekomendasi

Jika sistem belum memenuhi standar, maka dilakukan tahap rekonfigurasi.

E. Rekonfigurasi Sistem Pentanahan

Rekonfigurasi dilakukan dengan memodifikasi parameter desain, antara lain:

- a. Penambahan jumlah *ground rod*
- b. Perubahan panjang *ground rod*
- c. Penyesuaian jarak konduktor *grid*
- d. Perubahan kedalaman penanaman
- e. Penambahan lapisan permukaan ber-resistivitas tinggi

Beberapa alternatif konfigurasi disimulasikan untuk memperoleh desain optimal.

F. Simulasi Desain Usulan

Setiap konfigurasi hasil rekonfigurasi disimulasikan kembali untuk memperoleh nilai:

- a. Tahanan pentanahan
- b. Tegangan sentuh maksimum
- c. Tegangan langkah maksimum
- d. Distribusi tegangan permukaan

Konfigurasi yang memenuhi kriteria keselamatan dipilih sebagai desain terbaik.

G. Analisis Perbandingan

Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi eksisting dan hasil rekonfigurasi menggunakan parameter utama sistem pertanahan.

Efektivitas rekonfigurasi dihitung menggunakan persentase penurunan tegangan sebagai berikut:

$$Wp = (Veks - Vbaru) / Veks \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

Wp: Persentase penurunan (%)

Veks: Tegangan kondisi eksisting (V)

Vbaru : Tegangan setelah rekonfigurasi (V)

Analisis ini digunakan untuk menentukan tingkat peningkatan keselamatan sistem.

G. Validasi dan Interpretasi

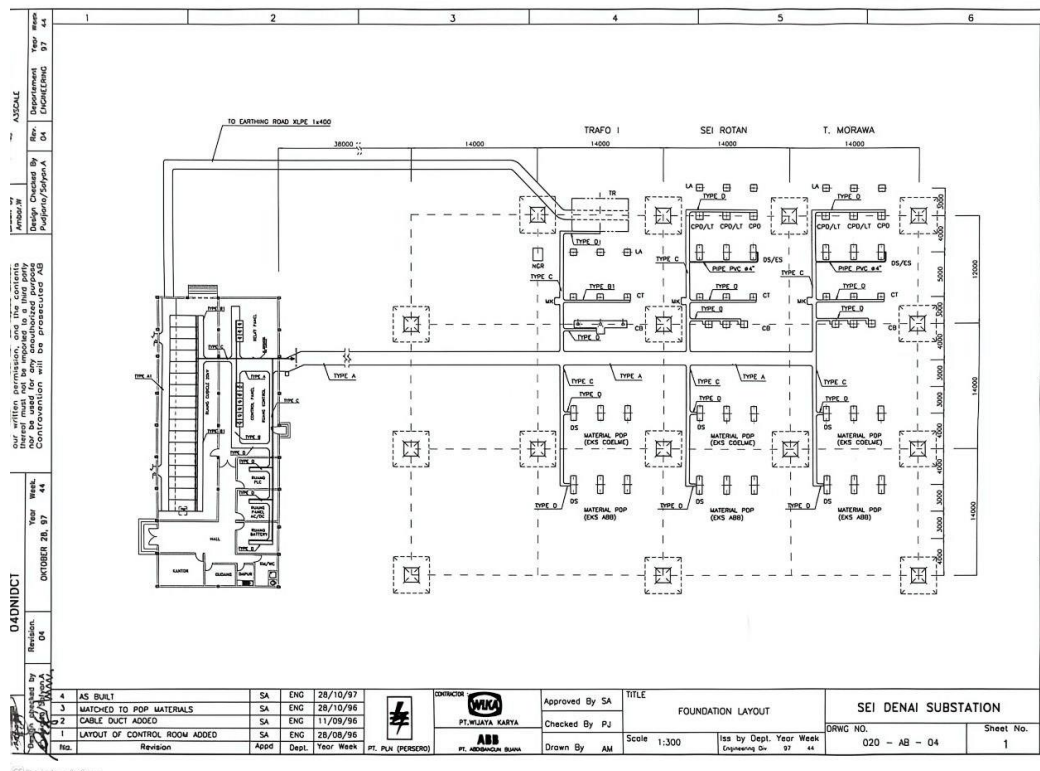
Hasil simulasi divalidasi menggunakan perhitungan analitis berdasarkan persamaan standar sistem pentanahan. Selanjutnya dilakukan interpretasi teknis untuk menilai implikasi terhadap keselamatan operator, keandalan sistem, dan rekomendasi desain.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem pentanahan pada Gardu Induk Denai 150 kV menggunakan konfigurasi *grid-rod* yang ditanam pada kedalaman 0,8 m. Kondisi tanah didominasi batu koral dengan resistivitas relatif tinggi sehingga kemampuan disipasi arus gangguan lebih rendah dibandingkan tanah basah atau tanah liat.

Hasil pengukuran lapangan menunjukkan nilai tahanan jenis tanah sebesar 100,48 $\Omega \cdot m$ yang digunakan sebagai parameter utama dalam pemodelan *simulation* menggunakan *software ETAP 19.0.1*.



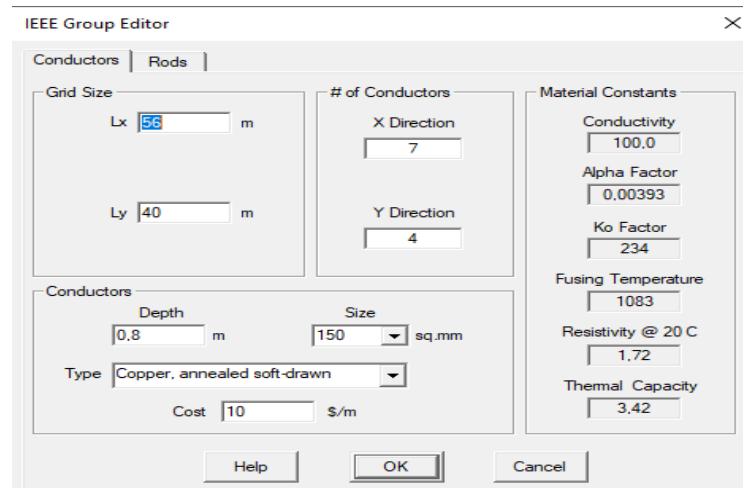
Gambar 2 menunjukkan *layout* sistem pentanahan Gardu Induk Denai 150 kV yang menjadi dasar pemodelan.

Gambar 2 memperlihatkan konfigurasi *grid* pentanahan berbentuk persegi panjang dengan dimensi 56 m \times 40 m serta posisi pemasangan *ground rod* pada setiap sudut area gardu induk. Data teknis sistem pentanahan yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1 yang meliputi parameter tanah, parameter gangguan, serta karakteristik konduktor. Data tersebut digunakan sebagai *input simulation* untuk mengevaluasi keselamatan sistem pentanahan berdasarkan standar IEEE Std 80.

A. Analisis Sistem Pentanahan Gardu Induk Denai 150 kV

1. Sistem Pentanahan Eksisting

Sistem pentanahan yang terpasang berbentuk *grid* persegi panjang dengan luas 56 m \times 40 m dan jarak antar konduktor utama sebesar 7 m. *Ground rod* dipasang pada setiap sudut *grid* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 3. konfigurasi sistem pentanahan eksisting yang digunakan sebagai dasar perhitungan manual dan *simulation* menggunakan *software ETAP 19.0.1*.

Analisis sistem pentanahan dilakukan melalui:

- Perhitungan manual
- Simulation* menggunakan *ETAP 19.0.1*

Tahapan analisis meliputi:

- Faktor reduksi
- Touch voltage* dan *step voltage* yang diizinkan
- Resistansi pentanahan
- Arus *grid* maksimum
- Ground Potential Rise (GPR)*

Hasil perhitungan panjang total konduktor diperoleh:

$$L = 988 \text{ m}$$

$$\text{Luas area} = 2240 \text{ m}^2$$

Nilai resistansi pentanahan hasil perhitungan manual sebesar:

$$R_g = 0,07 \Omega$$

Nilai tersebut berada di bawah batas standar ($< 1 \Omega$), sehingga secara teoritis sistem pentanahan dinyatakan aman.

2. Analisis Arus Gangguan dan Arus *Grid* Maksimum

Arus gangguan satu fasa ke tanah (*fault current*) sebesar 40 kA dengan faktor pembagi arus menghasilkan arus *grid* maksimum sebesar:

$$I_g = 24 \text{ kA}$$

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Arus *grid* maksimum menjadi parameter utama dalam analisis keselamatan karena mempengaruhi:

- Ground Potential Rise (GPR)*
- Touch voltage*
- Step voltage*

Durasi gangguan yang digunakan adalah 0,3 detik, yang masih sesuai rekomendasi standar IEEE untuk analisis keselamatan manusia.

3. Analisis *Ground Potential Rise (GPR)* Sistem Eksisting

Ground Potential Rise (GPR) merupakan kenaikan potensial sistem pentanahan terhadap tanah referensi akibat arus gangguan yang mengalir ke tanah.

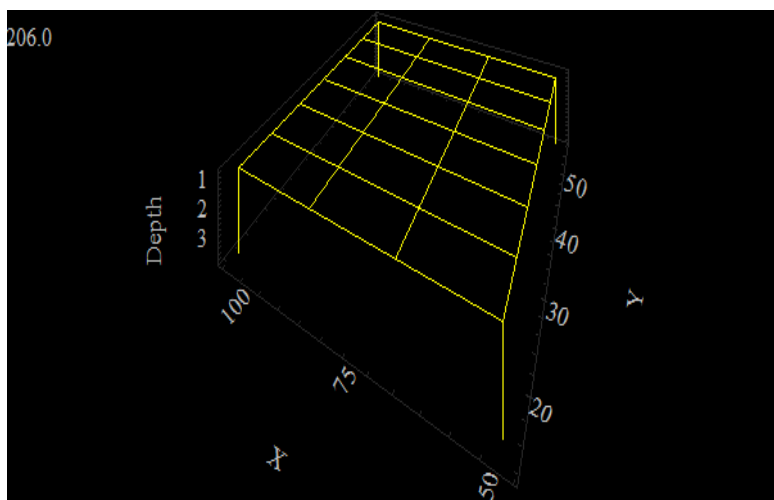
Hasil perhitungan manual menghasilkan nilai:

$$GPR \approx 24 \text{ kV}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun resistansi pentanahan kecil, arus gangguan besar dapat menyebabkan kenaikan tegangan permukaan tanah yang signifikan dan berpotensi menimbulkan risiko keselamatan.

4. Hasil Simulation Sistem Eksisting Menggunakan ETAP

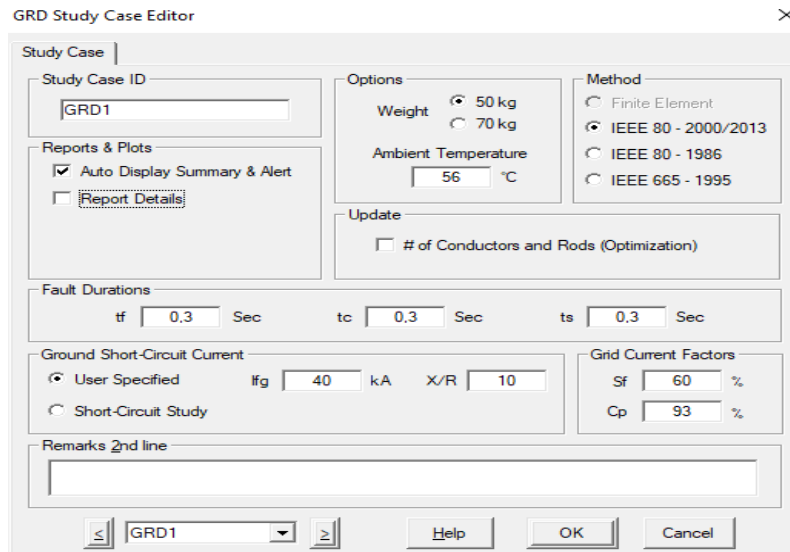
Pemodelan sistem pentanahan dilakukan menggunakan *software ETAP 19.0.1* berdasarkan parameter pada Tabel 4



Gambar 4 menunjukkan konfigurasi *grid* dan *rod* pada model *simulation*.

Gambar 4 memperlihatkan visualisasi sistem pentanahan pada ETAP yang digunakan untuk analisis distribusi potensial tanah, *Ground Potential Rise (GPR)*, serta evaluasi *touch voltage* dan *step voltage*. Gambar 4 menunjukkan pengaturan parameter tanah pada *software ETAP* yang meliputi resistivitas tanah, lapisan batu pecah, dan kedalaman lapisan tanah.

Simulasi Berat Badan 50 kg



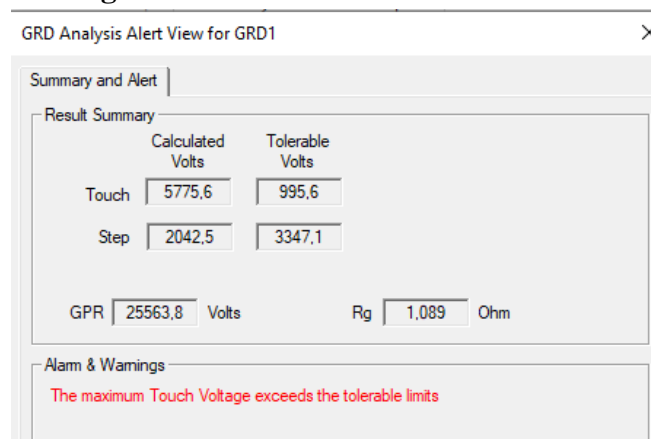
Gambar 5. Hasil *simulation* untuk asumsi berat badan manusia 50 kg.

Hasil *simulation* menunjukkan:

- Touch voltage* aktual: 5775,6 V (melebihi batas)
- Step voltage*: 2042,5 V (aman)
- Ground Potential Rise (GPR)*: 25.563,8 V
- Rg: 1,089 Ω

Hal ini menunjukkan sistem pentanahan eksisting belum aman terhadap risiko *touch voltage*.

Simulasi Berat Badan 70 kg



Gambar 6. Hasil *simulation* untuk asumsi berat badan manusia 70 kg.

Hasil menunjukkan:

- Touch voltage* masih melebihi batas
- Step voltage* tetap aman

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

c. *Ground Potential Rise (GPR)* tinggi

Sehingga sistem pentanahan eksisting memerlukan *reconfiguration*.

4. Perbandingan Perhitungan Manual dan Simulation

Perbandingan antara perhitungan manual dan *simulation* menggunakan *ETAP 19.0.1* menunjukkan:

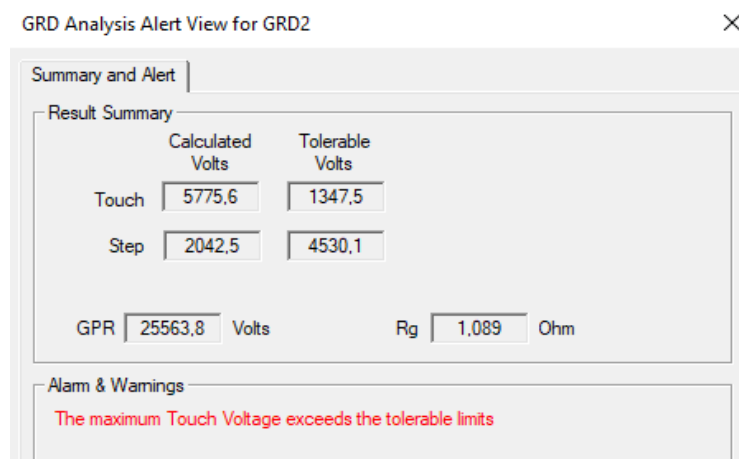
- Nilai R_g manual lebih kecil karena asumsi ideal
- Simulation* lebih realistis
- Nilai batas *touch voltage* konsisten
- Perbedaan GPR dipengaruhi model tanah

Hal ini menegaskan bahwa *simulation* memberikan hasil lebih konservatif dan mendekati kondisi lapangan.

5. Rekonfigurasi Sistem Pentanahan

Rekonfigurasi dilakukan karena nilai *touch voltage* eksisting melebihi batas standar. Perbaikan dilakukan melalui:

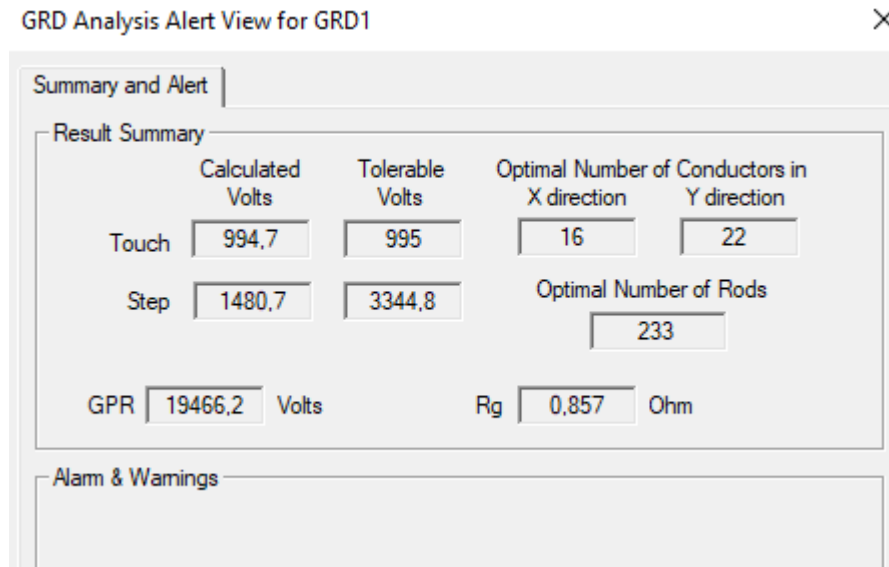
- Penambahan *ground rod*
- Peningkatan kerapatan *grid*
- Optimasi distribusi konduktor



Gambar 7. Konfigurasi sistem setelah *reconfiguration*.

Gambar tersebut memperlihatkan peningkatan kerapatan *grid* yang menghasilkan distribusi potensial tanah lebih merata.

Hasil Rekonfigurasi (50 kg)

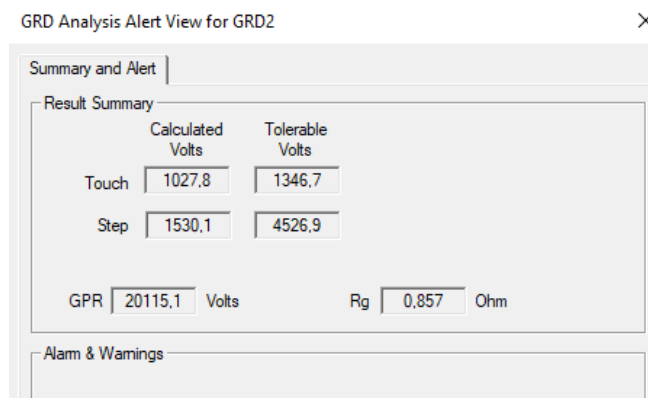


Gambar 8 menunjukkan hasil *simulation* setelah *reconfiguration*.

Hasil menunjukkan:

- Touch voltage* = 994,7 V (memenuhi batas)
- Step voltage* aman
- Ground Potential Rise (GPR)* menurun
- Rg menurun

Hasil Rekonfigurasi (70 kg)



Gambar 9 menunjukkan hasil *simulation* setelah *reconfiguration* untuk berat 70 kg.

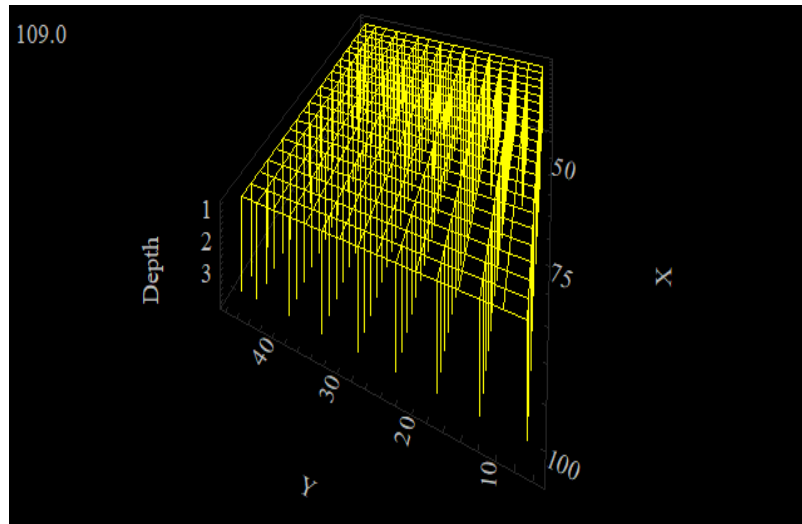
Hasil menunjukkan:

- Touch voltage* memenuhi standar
- Step voltage* aman
- Margin keselamatan meningkat

B. Pembahasan

1. Dasar Dilakukannya Rekonfigurasi

Analisis menunjukkan sistem eksisting belum memberikan margin keselamatan optimal karena *touch voltage* melebihi batas pada beberapa kondisi.



Gambar 10 menunjukkan bentuk *grid* setelah *reconfiguration* yang lebih rapat dan homogen.

Konfigurasi ini memperluas area disipasi arus gangguan serta menurunkan gradien potensial permukaan tanah.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan dan *simulation* menggunakan *software ETAP*, sistem pentanahan eksisting Gardu Induk Denai 150 kV belum sepenuhnya memenuhi kriteria keselamatan menurut IEEE Std 80-2000. Meskipun nilai tahanan pentanahan masih mendekati batas rekomendasi, hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *touch voltage* pada beberapa titik melebihi batas yang diizinkan untuk asumsi berat badan 50 kg maupun 70 kg, sedangkan *step voltage* masih berada dalam kategori aman. Setelah dilakukan *reconfiguration* melalui modifikasi konfigurasi *grid* dan penambahan *ground rod*, terjadi penurunan nilai tahanan pentanahan dan *Ground Potential Rise (GPR)* secara signifikan. Nilai *touch voltage* berhasil diturunkan hingga berada di bawah batas standar keselamatan, serta distribusi tegangan permukaan tanah menjadi lebih merata tanpa adanya area berpotensi bahaya. Dengan demikian, rekonfigurasi sistem pentanahan yang diusulkan terbukti efektif dalam meningkatkan tingkat keselamatan dan perlindungan personel pada kondisi gangguan sebesar 40 kA.

V. REFERENSI

- [1] 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," *JJEEE*, vol. 6, no. 2, pp. 206–211, Jul. 2024, doi: 10.37905/jjee.v6i2.25224.
- [2] A. Fitriani, J. Hidayat, J. Panjaitan, S. A. Syahputra, and M. Alfisari, "Calculation of the Effect of Substation Configuration on the Resistance Value of the Grounding System," *J.*

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

- Renew Energ. Electric. Comp Eng*, vol. 5, no. 1, pp. 45–50, Mar. 2025, doi: 10.29103/jreece.v5i1.15014.
- [3] T. Wati, R. Ramadhan, M. Aji, and A. Ramdhan, “Grounding Analysis Based on Different Soil Characteristics in The Distribution System,” *ELKHA*, vol. 16, no. 1, p. 1, Apr. 2024, doi: 10.26418/elkha.v16i1.69278.
- [4] M. B. Bastian, W. D. Carman, and D. J. Woodhouse, “Real-Time Monitoring of Substation Ground Potential Rise and Grounding System Impedance Using Power System Faults,” *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 51, no. 6, pp. 5298–5304, Nov. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2425361.
- [5] A. Mistry, T. Shah, and S. Agrawal, “A Review Paper on Parameter for Substation Grounding Design and Various Softwares Used.,” *J. Electrical Systems*, pp. 2594–2601, 2024.
- [6] A. Fitriani, J. Hidayat, J. Panjaitan, S. A. Syahputra, and M. Alfisari, “Calculation of the Effect of Substation Configuration on the Resistance Value of the Grounding System,” *J. Renew Energ. Electric. Comp Eng*, vol. 5, no. 1, pp. 45–50, Mar. 2025, doi: 10.29103/jreece.v5i1.15014.
- [7] A. Fitriani, J. Panjaitan, S. A. Syahputra, A. Pakpahan, R. Sirait, and E. Hutajulu, “Threshold Potential Simulation on Grounding System using CYMGround Substation Program,” *ELKOMIKA*, vol. 13, no. 1, p. 1, Feb. 2025, doi: 10.26760/elkomika.v13i1.1.
- [8] I. N. A. Saputro and P. Oetomo, “PERBANDINGAN PERHITUNGAN DAN SIMULASI ETAP SISTEM PENTANAHAN GRID-ROD PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MESIN GAS,” *SND*, vol. 22, no. 4, pp. 43–53, Oct. 2020, doi: 10.37277/s.v22i4.870.
- [9] R. K. Ahir, R. K. Yadav, and K. A. Vyas, “Multi-Variable Optimization of AC Substation Grounding Grid,” *SSRG-IJEEE*, vol. 13, no. 1, pp. 103–113, Jan. 2026, doi: 10.14445/23488379/IJEEE-V13I1P110.
- [10] 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,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 13, p. 7491, Jun. 2023, doi: 10.3390/app13137491.
- [11] Y. Wang, J. Jiang, Y. Huang, and J. Wang, “Design of substation grounding grid in CFETR,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 25009, Oct. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-76764-5.
- [12] F. Qiu, J. Cao, Y. Ding, Y. Du, and Z. Du, “Simulation of Ground Potential Distribution around Grounding Grids using a PEEC Method,” in *2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, May 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICPS54075.2022.9773799.