

PERBANDINGAN PERHITUNGAN DAN SIMULASI ETAP SISTEM PENTANAHAN *GRID-ROD* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MESIN GAS

Irwansyah Noor Ari Saputro dan Poedji Oetomo
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Sains Dan Teknologi Nasional
Jalan Moh Kahfi II, Srengseng Sawah, Jagakarsa, Jakarta Selatan

ABSTRAK

Setiap pembangkit listrik harus memiliki sistem pentanahan yang handal untuk mengamankan peralatan dan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung sistem pentanahan grid-rod yang memenuhi standar aman sesuai IEEE std. 80-2000 pada pembangkit listrik tenaga mesin gas yang berlokasi di Masohi, Maluku dengan tahanan jenis tanah sebesar 59,6 ohm.meter, arus gangguan maksimum ke tanah sebesar 50.489 ampere. Dalam analisis menggunakan perhitungan manual dan simulasi ETAP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tahanan pentanahan sebesar 0,49 ohm, tegangan sentuh sebesar 4330,01 volt, dan tegangan langkah sebesar 1530,23 volt. Perhitungan sistem pentanahan memenuhi persyaratan aman IEEE std. 80-2000.

Kata kunci : Pentanahan, Tahanan pentanahan, Tegangan langkah, Tegangan sentuh

ABSTRACT

Every power plant must have a reliable grounding system to secure equipment and people. This study aims to calculate a grid-rod grounding system that meets safe standards according to IEEE std. 80-2000 at a gas engine power plant located in Masohi, Maluku with a soil type resistance of 59.6 ohm.meter, the maximum disruption current to the ground is 50489 amperes. In the analysis using manual calculations and ETAP simulation. The results showed that the ground resistance value was 0.49 ohms, the touch voltage was 4330.01 volts, and the step voltage was 1530.23 volts. Grounding system calculations meets the IEEE std. 80-2000.

Key word : Grounding, Ground resistance, Step voltage, Touch voltage

1. PENDAHULUAN

Program 35000 MW adalah salah satu program pemerintah untuk membangun pembangkit listrik mencapai 35000 Megawatt. Bertujuan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat Indonesia dari Sabang sampai Merauke, dan diharapkan berdampak signifikan bagi pertumbuhan ekonomi di luar Jawa, yang sebelumnya kekurangan suplai listrik. Salah satu pembangunan yang sedang dilaksanakan adalah PLTMG Seram, Masohi Maluku Tengah yang berkapasitas 20 MW.

Setiap pusat listrik yang baru dibangun harus memiliki sistem pentanahan yang baik agar meningkatkan keandalan dan melayani kebutuhan beban dengan baik. Dalam suatu pembangkit listrik bukan hanya terdapat peralatan kelistrikan maupun instrumen

yang mendukung kinerja optimum dari suatu pembangkit, namun juga terdapat orang yang bekerja di dalam lokasi pembangkit yang harus dijamin keamanannya.

Pada sistem pentanahan, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan seperti, jenis tanah di sekitar area yang akan dibangun pembangkit, desain pentanahan, serta bentuk konfigurasi penanaman elektroda di dalam tanah. Hal tersebut sangat berhubungan erat dalam mendapatkan sistem pentanahan yang baik dan aman bagi pembangkit. Pada penelitian ini menggunakan desain pentanahan *Grid-Rod* untuk menghasilkan desain yang efisien dan paling optimal secara teknis, serta tahanan pentanahan yang lebih kecil. Sehingga pada penelitian ini akan membahas sistem pentanahan yang handal dan aman dengan perhitungan manual, dan

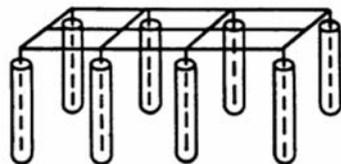
akan disimulasikan dengan *software* ETAP

2. LANDASAN TEORI

2.1. Sistem Pentanahan *Grid-Rod*

Sistem pentanahan adalah suatu rangkaian mulai dari elektroda, hantaran penghubung (*conductor*) sampai terminal pentanahan yang berfungsi untuk menyalurkan arus lebih ke bumi sehingga dapat memberikan proteksi terhadap manusia dari sengatan listrik dan mengamankan komponen-komponen instalasi agar dapat terhindar dari bahaya arus dan tegangan asing, serta perangkat dapat beroperasi sesuai dengan ketentuan teknis yang semestinya.

Pentanahan *Grid-Rod* merupakan modifikasi desain dari pentanahan *Grid* dimana pada konduktor grid ditancapkan batang pentanahan (*ground rod*) secara vertikal yang jumlah dan susunan konfigurasi penanamannya tergantung dari desain yang diinginkan (lihat gambar 2.1). Biasanya sering digunakan dalam sistem pentanahan pada gardu induk. Tahanan pentanahan pada gardu induk dengan pentanahan *Grid-Rod* tentunya lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan pentanahan *Grid* tanpa batang pentanahan.



Gambar 2.1 Pentanahan *grid-rod*

2.2. Tahanan Jenis Tanah

Faktor keseimbangan antara tahanan pengetanahan dan kapasitansi di sekelilingnya adalah tahanan jenis tanah (ρ). Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tidaklah sama. Beberapa faktor yang mempengaruhi tahanan jenis tanah yaitu:

1. Pengaruh keadaan struktur tanah
2. Pengaruh kandungan garam
3. Pengaruh temperature tanah

Tabel 2.1 menunjukkan nilai-nilai tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah :

12.6.0.

Tabel 2.1 Tahanan jenis tanah

No	Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah [Ohm-m]
1	Tanah Rawa	30
2	Tanah Liat dan Ladang	100
3	Pasir Basah	200
4	Kerikil Basah	500
5	Pasir Kerikil Kering	1000
6	Tanah Berbatu	3000

2.3. Tahanan Pentanahan

Tahanan pentanahan adalah tahanan total yang dimiliki oleh suatu sistem pentanahan, yang meliputi:

1. Tahanan elektroda pentanahan itu sendiri dan penghantar pentanahan yang menghubungkan ke peralatan yang ditanahkan.
2. Tahanan kontak antara elektroda pentanahan dengan tanah.
3. Tahanan massa tanah sekeliling elektroda pentanahan.

Tahanan yang pengaruhnya dominan adalah tahanan massa tanah sekeliling elektroda pentanahan atau dengan kata lain tahanan jenis tanah. Besarnya tahanan pentanahan akan menentukan baik buruknya suatu sistem pentanahan. Semakin kecil nilai tahanan pentanahan, maka akan semakin baik sistem pentanahannya. Dengan nilai tahanan pentanahan yang kecil akan menyebabkan arus gangguan dengan cepat mengalir ke dalam tanah.

Syarat tahanan pentanahan dalam suatu instalasi listrik biasanya maksimum 5 Ohm. Jika nilai tahanan pentanahan lebih besar dari 5 Ohm, maka dapat dilakukan metode-metode untuk memperkecil tahanan pentanahan, yaitu dengan menggunakan elektroda pentanahan yang luas area kontakannya lebih besar, memperdalam penanaman elektroda pentanahan ke dalam tanah, memparalelkan dua atau lebih elektroda pentanahan dan memberikan campuran zat elektrolit ke dalam tanah.

Standar yang telah disepakati adalah nilai tahanan pentanahan pada sebuah

bangunan gedung harus lebih kecil dari 5 Ohm. Sedangkan, pada gardu induk dalam suatu sistem tenaga listrik, tahanan pentanahannya tidak melebihi 1 Ohm dan untuk saluran transmisi tenaga listrik, tahanan pentanahan maksimal 10 Ohm masih dapat diterima.

Ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap nilai tahanan pentanahan.

1. Bentuk elektroda.
Ada beberapa macam bentuk dari elektroda itu sendiri yang banyak digunakan, seperti jenis batang, pelat, dan pita.
2. Jenis bahan dan ukuran elektroda.
Elektroda dipilih dari bahan-bahan tertentu yang memiliki konduktivitas sangat baik dan tahan terhadap sifat-sifat yang merusak dari tanah, seperti korosi. Ukuran elektroda dipilih yang mempunyai kontak paling efektif dengan tanah. Prinsip dasar untuk memperoleh resistansi pentanahan yang kecil adalah dengan membuat permukaan elektroda bersentuhan dengan tanah sebesar mungkin.
3. Jumlah atau konfigurasi elektroda.
Untuk mendapatkan tahanan pentanahan yang diharapkan dan apabila tidak memenuhi standart yang ditentukan dengan satu elektroda, bisa digunakan metode paralel dengan cara menambah lebih banyak elektroda dengan bermacam-macam konfigurasi pemancangannya di dalam tanah.
4. Kedalaman penanaman di dalam tanah.
Untuk kedalaman penanaman elektroda pentanahan ini tergantung dari pada jenis dan sifat-sifat tanah.

2.4. Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah

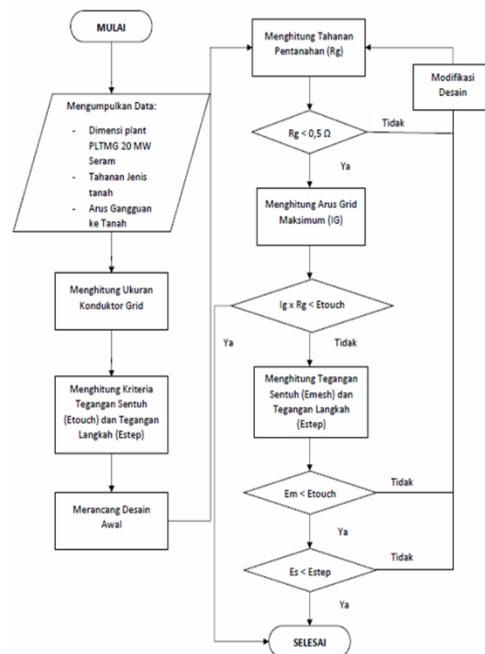
Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat di antara suatu obyek yang disentuh dan suatu titik tertentu, dengan asumsi bahwa obyek yang disentuh dihubungkan dengan kisi-kisi pentanahan yang berada di bawahnya.

Tegangan langkah adalah tegangan yang timbul di antara dua kaki orang yang sedang berdiri di atas tanah yang sedang dialiri oleh arus gangguan ke tanah.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Perancangan Sistem Pentanahan

Berdasarkan uraian perancangan sistem pentanahan dengan metode desain *Grid-Rod* pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTMG) berkapasitas 20 MW, maka dapat dilihat pada gambar 3.1 diagram alir atau langkah-langkah dalam penghitungan sistem pentanahan berdasarkan standar IEEE std. 80-2000 :



Gambar 3.1 Diagram alir proses perancangan sistem pentanahan *Grid-Rod*

Dari diagram alir diatas, dalam perancangan sistem pentanahan *Grid-Rod* pada PLTMG 20 MW Seram memiliki langkah-langkah pengerjaan sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data-data pendukung dalam perhitungan pentanahan diantaranya data dimensi tanah area pembangkitan, kemudian data tahanan jenis tanah untuk area tersebut. Mengumpulkan data lapangan terkait dimensi PLTMG, tahanan jenis tanah di area PLTMG melalui pengukuran di lapangan yang diperoleh dari survey geolistrik, serta data arus gangguan ke tanah (310) diperoleh dari simulasi pada software ETAP.
2. Menentukan ukuran konduktor grid yang digunakan dalam sistem pentanahan *Grid-Rod* yang besarnya bergantung pada material konduktor

yang digunakan, arus gangguan dan lama terjadinya gangguan. Luas penampang minimum konduktor pentanahan yang digunakan sebagai grid dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.1 :

$$A = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot \alpha_r}{T_m - T_a}\right)^2 + \left(\frac{K_o}{T_m - T_a}\right)^2}} \quad (3.1)$$

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3.2)$$

dimana :

- I_f : arus gangguan ke tanah (kA)
- t_c : durasi gangguan (s)
- A : luas penampang konduktor (mm^2)
- d : diameter konduktor grid (m)
- T_m : suhu maksimum yang diizinkan ($^{\circ}C$)
- T_a : suhu lingkungan ($^{\circ}C$)
- α_r : koefisien suhu dari resistivitas konduktor pada suhu $20^{\circ}C$ ($^{\circ}C^{-1}$)
- ρ_r : resistivitas dari konduktor pentanahan pada suhu $20^{\circ}C$ ($\mu\Omega\text{-cm}$)
- K_o : $1/\alpha_o$ atau $(1/\alpha_r) - T_r$ ($^{\circ}C$)
- TCAP : kapasitas thermal konduktor per unit volume ($J/(cm^3 \cdot ^{\circ}C)$)
- α_o : koefisien suhu dari tahanan jenis konduktor pada suhu $0^{\circ}C$

3. Menghitung kriteria tegangan sentuh dan tegangan langkah yang masih diizinkan dengan persamaan berikut :

$$E_{touch50} = (1000 + 1.6 C_1 \rho_s) \frac{0.225 I_f}{\sqrt{t_c}} \quad (3.2)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.6 C_1 \rho_s) \frac{0.25 I_f}{\sqrt{t_c}} \quad (3.3)$$

$$E_{step50} = (1000 + 6 C_1 \rho_s) \frac{0.225 I_f}{\sqrt{t_c}} \quad (3.4)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6 C_1 \rho_s) \frac{0.25 I_f}{\sqrt{t_c}} \quad (3.5)$$

$$C_2 = 1 - \frac{0.005 (T - 20)}{50 + 0.005 T} \quad (3.6)$$

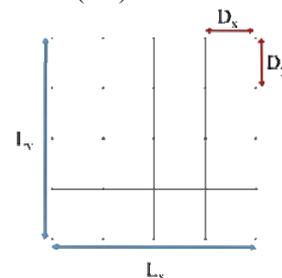
dimana :

- $E_{touch50}$: tegangan sentuh untuk berat badan manusia 50 kg (V)
- $E_{touch70}$: tegangan sentuh untuk berat badan manusia 70 kg (V)
- E_{step50} : tegangan langkah untuk berat badan manusia 50 kg (V)
- E_{step70} : tegangan langkah untuk berat badan manusia 70 kg (V)

- C_s : faktor reduksi lapisan material permukaan
- ρ : tahanan jenis tanah ($\Omega\text{-m}$)
- ρ_s : tahanan jenis material permukaan ($\Omega\text{-m}$)
- t_s : lama terjadinya gangguan (detik)
- h_s : ketinggian atau ketebalan material pelapis permukaan tanah (m)

Nilai $C_s = 1$ dan $\rho_s = \rho$ jika permukaan tanah tidak menggunakan material lapisan pelindung. Pada praktiknya, berat badan rata-rata manusia di dalam dan sekitar area pembangkit adalah sekitar 70 kg.

4. Merancang desain awal, sistem pentanahan Grid-Rod yang digunakan bergantung pada konfigurasi konduktor grid, kedalaman penanaman konduktor grid, dan konfigurasi batang pentanahan rod. Variabel yang berpengaruh dalam konfigurasi konduktor grid adalah jarak antara konduktor paralel pada sisi panjang dan sisi lebar (D_x dan D_y), jumlah konduktor paralel pada sisi panjang dan sisi lebar (n_x dan n_y), juga panjang total konduktor grid (L_c). Variabel yang berpengaruh dalam konfigurasi batang pentanahan rod adalah jumlah batang pentanahan (nR) dan panjang total batang pentanahan (LR).



Gambar 3.2 Konfigurasi konduktor grid

Panjang total konduktor (L_c) berdasarkan gambar 3.2 dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$D_x = \frac{L_x}{n_x - 1} \quad (3.7)$$

$$D_y = \frac{L_y}{n_y - 1} \quad (3.8)$$

$$L_c = L_x \left(\frac{n_x}{D_x} + 1 \right) + L_y \left(\frac{n_y}{D_y} + 1 \right) \quad (3.9)$$

$$L_R = L_c \cdot nR \quad (3.10)$$

$$L_T = L_c + L_R \quad (3.11)$$

dimana :

- L_x : panjang maksimum konduktor grid pada sisi panjang (m)
- L_y : panjang maksimum konduktor grid pada sisi lebar (m)
- n_x : jumlah konduktor paralel pada sisi panjang
- n_y : jumlah konduktor paralel pada sisi lebar
- D_x : jarak antar konduktor paralel pada sisi panjang (m)
- D_y : jarak antar konduktor paralel pada sisi lebar (m)
- L_R : panjang total batang konduktor (*rod*) (m)
- L_T : panjang batang konduktor (*rod*) (m)
- n_R : jumlah batang pentanahan
- L_C : panjang total konduktor grid (m)
- L_T : panjang total konduktor grid dan batang pentanahan (m)

5. Menghitung tahanan pentanahan dengan menggunakan persamaan Schwarz :

$$R_{21} = \frac{\rho}{n_x D_x} \left[\ln \left(\frac{L_C}{L_T} \right) + \frac{L_C D_x}{\sqrt{L_C}} - k_1 \right] \quad (3.12)$$

$$R_{22} = \frac{\rho}{2 n_y D_y} \left[\ln \left(\frac{L_C}{L_T} \right) - 1 + \frac{L_C D_y}{\sqrt{L_C}} (\sqrt{D_y} - 1)^2 \right] \quad (3.13)$$

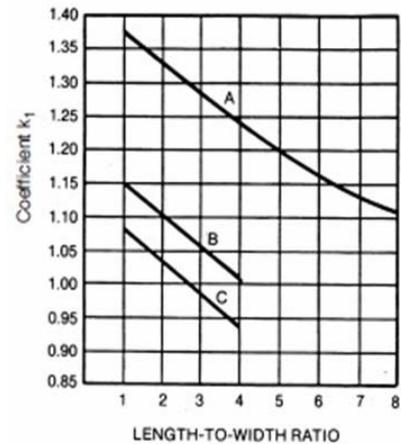
$$R_{23} = \frac{\rho}{n_x D_x} \left[\ln \left(\frac{L_C}{L_T} \right) + \frac{L_C D_x}{\sqrt{L_C}} - k_1 + 1 \right] \quad (3.14)$$

$$R_p = \frac{R_{21} R_{22} - R_{23}^2}{R_{21} + R_{22} - 2 R_{23}} \quad (3.15)$$

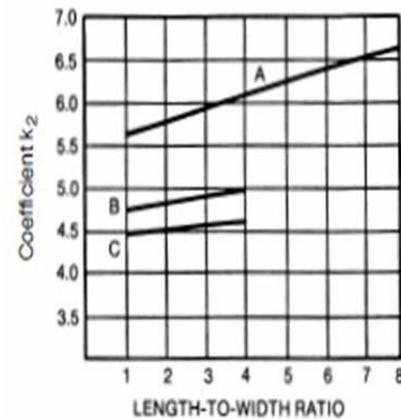
dimana :

- R_g : tahanan pentanahan [Ω]
- R_1 : tahanan konduktor grid [Ω]
- R_2 : tahanan batang pentanahan [Ω]
- R_m : tahanan mutual antara konduktor grid dan batang pentanahan [Ω]
- ρ : tahanan jenis tanah [Ω -m]
- A : luas area pentanahan grid [m^2]
- L_C : panjang total konduktor grid [m]
- $2a$: diameter konduktor grid [m]
- a' : $\sqrt{2ah}$ untuk grid yang ditanam pada kedalaman h [m]
- a' : a untuk grid pada permukaan tanah [m]
- L_r : panjang satu batang pentanahan [m]
- $2b$: diameter batang pentanahan [m]

n_R : jumlah batang pentanahan
 k_1, k_2 : koefisien (lihat gambar 3.3 dan 3.4)



Gambar 3.3 Koefisien k_1 untuk Persamaan Schwarz



Gambar 3.4 Koefisien k_2 untuk Persamaan Schwarz

6. Menghitung arus grid maksimum (I_G) yang mengalir melalui grid pentanahan.

$$I_G = S_f I_f \quad (3.16)$$

$$I_G = C_p D_f I_f \quad (3.17)$$

dimana :

- I_G : arus grid maksimum (kA)
- I_f : arus grid simetris (kA)
- C_p : faktor proyeksi korektif yang dihitung untuk kenaikan relatif arus gangguan selama keberlangsungan sistem. Untuk sistem dengan pertumbuhan nol $C_p = 1$
- D_f : faktor penurunan (*decrement factor*), $D_f = 1$ jika $f > 25$ Hz

S_f : faktor pembagi arus gangguan (*split factor*)

7. Menghitung GPR (*Ground Potential Rise*) dengan persamaan berikut :

$$GPR = I_G \times R_g \tag{3.18}$$

dimana :

GPR : kenaikan potensial bumi (V)

I_G : arus grid maksimum (kA)

R_g : tahanan pentanahan (Ohm)

Apabila nilai $GPR < E_{touch}$ (tegangan sentuh) maka sistem pentanahan *Grid-Rod* memenuhi standar aman yang sudah ditetapkan. Sebaliknya, jika nilai $GPR >$ Kriteria E_{touch} maka evaluasi berlanjut ke langkah selanjutnya.

8. Menghitung tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya menggunakan persamaan berikut :

$$E_m = \frac{E_s \times K_s}{K_m} \tag{3.19}$$

$$K_m = \frac{1}{K_s} \left[\ln \left(\frac{D^2 + (D+2h)^2 - \frac{h^2}{4d}}{4d^2} \right) + \frac{2h}{D} \ln \left(\frac{D}{D+2h} \right) \right] \tag{3.20}$$

$$L_M = L_c + \left(1,88 + 1,22 \left(\frac{L_c}{\sqrt{L_c^2 + L_p^2}} \right) \right) \times r \tag{3.21}$$

$$K_i = 0,644 + 1,149h \tag{3.22}$$

$$K_s = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \tag{3.23}$$

dimana :

ρ : tahanan jenis tanah (Ohm-m)

I_G : arus grid maksimum (kA)

K_m : faktor geometrik tegangan *mesh*

D : jarak antar konduktor paralel (m)

d : diameter konduktor *grid* (m)

h : kedalaman penanaman konduktor (m)

h_0 : 1 meter (kedalaman penanaman konduktor referensi)

K_i : faktor koreksi geometri grid

n : faktor geometris

L_c : panjang total konduktor grid (m)

L_p : keliling area pentanahan grid (m)

L_x : panjang maksimum konduktor grid pada sisi panjang (m)

L_y : panjang maksimum konduktor grid pada sisi lebar (m)

D_m : jarak maksimum antara dua grid (m)

$$E_s = \frac{I_G \times R_g}{K_s} \tag{3.24}$$

$$K_s = \frac{1}{K_m} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+2h} + \frac{1}{D} [1 - 0,67^{-1}] \right) \tag{3.25}$$

$$L_s = 0,78L_c + 0,96L_p \tag{3.26}$$

dimana :

ρ : tahanan jenis tanah (Ohm-m)

I_G : arus grid maksimum (kA)

L_s : panjang efektif dari $L_c + L_p$ untuk tegangan langkah (m)

K_s : faktor geometrik tegangan langkah

9. Mengevaluasi rancangan, nilai tahanan pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkahnya harus memenuhi persyaratan-persyaratan standar aman :

a. Nilai tahanan pentanahan mendekati nol atau ≤ 0.5 Ohm

b. Tegangan mesh lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan ($E_{mesh} <$ Kriteria E_{touch})

c. Tegangan langkah sebenarnya lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan ($E_{step} <$ Kriteria E_{step})

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Perancangan Sistem Pentanahan

Data-data yang diperlukan untuk perhitungan dan perancangan sistem pentanahan adalah data lapangan berupa dimensi pembangkit, data tahanan jenis tanah, dan data arus gangguan ke tanah.

- Data lapangan dimensi plant.
Data tentang luas konduktor yang akan ditanam bergantung dari sejauh mana daerah yang akan dilindungi oleh sistem pentanahan. Pada pembangkit ini, daerah yang ingin dilindungi memiliki panjang 90 m dan lebar 40 m. Maka, luas daerah yang dilindungi adalah 3600 m².
- Data lapangan tahanan jenis tanah
Metode yang digunakan mengukur tahanan jenis tanah dalam pembangkit ini adalah metode geolistrik resistivitas dengan konfigurasi Schlumberger. Pengukuran menggunakan alat ukur earth tester dilakukan pada 5 titik

berbeda yang diberi nama GL-1 sampai GL-5. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data pengukuran tahanan jenis tanah di Masohi Maluku Tengah

Titik Geolistrik	Nilai Tahanan Jenis Tanah
GL-1 (Kedalaman 0-12 m)	73 Ω.m
GL-2 (Kedalaman 0-5 m)	60 Ω.m
GL-3 (Kedalaman 0-5 m)	61 Ω.m
GL-4 (Kedalaman 0-3 m)	51 Ω.m
GL-5 (Kedalaman 0-6 m)	53 Ω.m
TOTAL	298 Ω.m
RATA-RATA	59,6 Ω.m

- Data arus gangguan ke tanah PLTMG Seram 20 MW merupakan pembangkit yang sedang dibangun dengan perancangan pentanahan menggunakan desain Grid-Rod. Sehingga untuk data arus gangguan ke tanah didapatkan dengan mensimulasikan dengan software ETAP 12.6.0 dan didapatkan arus gangguan tertinggi ke tanah sebesar 50,48 kA.

4.2. Perhitungan Ukuran Konduktor

Jenis konduktor yang digunakan pada konduktor pentanahan (*grid*) maupun batang pentanahan adalah tembaga (*copper, annealed soft drawn*). Dengan menggunakan persamaan (3.1) didapat :

$$A = \frac{50,48}{\sqrt{\left(\frac{3,42 \times 10^{-4}}{1 \times 0,000993 \times 1,72}\right) \ln\left(\frac{234 + 1,089}{234 + 40}\right)}}$$

$$A = 179,1 \text{ mm}^2$$

Dari hasil perhitungan, luas penampang yang dibutuhkan adalah 179,1 mm². Luas konduktor yang dapat dipilih adalah 240 mm² sampai ke ukuran di atasnya. Dengan luas penampang ini, maka ukuran minimum diameter yang diperlukan dapat dihitung melalui persamaan (3.2) :

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 240}{\pi,14}}$$

$$d = 17,48 \text{ mm}$$

$$d = 0,0174 \text{ m}$$

Maka konduktor yang digunakan dalam sistem pentanahan ini adalah bare copper conductor (BCC) yang merupakan kawat tembaga telanjang berpilin berukuran 240 mm² dengan diameter 0,0174 m.

4.3. Perhitungan Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah yang Diizinkan

Perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah menggunakan perhitungan untuk manusia dengan berat 70 kg. Asumsi tersebut digunakan mempertimbangkan yang akan sering masuk dan keluar area pembangkit dan sekitarnya adalah pria dewasa baik sebagai operator pembangkit maupun pihak lain yang berkepentingan untuk berada di area pembangkit. Material pelapis tanah bagian atas yang digunakan adalah granite dengan resistivitas material permukaan 25.000 Ω.m, dengan ketebalan (*h_s*) 0,3 m, dan waktu kerja arus gangguan (*t_s*) 1 detik. Faktor koreksi didapat menggunakan persamaan (3.6) :

$$C_s = 1 - \frac{0,09 (1 - \frac{59,6}{25000})}{(2 \cdot 0,3) + 0,09}$$

$$C_s = 0,87$$

Dengan persamaan (3.3) untuk perhitungan tegangan sentuh dan persamaan (3.5) untuk perhitungan tegangan langkah, nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diperbolehkan adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} E_{\text{sentuh}70} &= (1.000 + 1,5 C_s \rho_s) \frac{0,187}{\sqrt{t}} \\ &= (1.000 + (1,5 \times 0,87 \times 25.000)) \frac{0,187}{\sqrt{1}} \\ &= 5278,40 \text{ Volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{langkah}70} &= (1.000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0,187}{\sqrt{t}} \\ &= (1.000 + (6 \times 0,87 \times 25.000)) \frac{0,187}{\sqrt{1}} \\ &= 20642,58 \text{ Volt} \end{aligned}$$

4.4. Perancangan Desain Awal

Desain awal menggunakan 5 buah konduktor paralel pada sisi panjang, dengan panjang maksimum konduktor 90 m dan 10

buah konduktor paralel pada sisi lebar, dengan panjang maksimum konduktor 60 m. Berdasarkan dengan persamaan (3.7) untuk menghitung D_x dan persamaan (3.8) untuk menghitung D_y , jarak antar konduktor D_x dan D_y adalah sebagai berikut:

$$D_x = \frac{10}{2-1}$$

$$D_x = 10 \text{ m}$$

$$D_y = \frac{40}{2-1}$$

$$D_y = 40 \text{ m}$$

Total panjang konduktor *grid* dihitung menggunakan persamaan (3.9) menghasilkan panjang sebesar :

$$L_r = 90 \left(\frac{40}{10} + 1 \right) + 40 \left(\frac{60}{10} + 1 \right)$$

$$= 850 \text{ m}$$

Untuk elektroda batang dirancang sepanjang 6 meter (L_r) dengan jumlah elektrode sebanyak 4 batang (n_R). Panjang total batang pentanahannya dihitung menggunakan persamaan (3.10) sebagai berikut:

$$L_R = 6 \times 4$$

$$= 24 \text{ m}$$

Selanjutnya menghitung nilai L_T , menggunakan persamaan (3.11) menjadi sebagai berikut:

$$L_T = 850 + 24$$

$$= 874 \text{ m}$$

4.5. Perhitungan Tahanan Pentanahan

Dengan menggunakan persamaan (3.12), perhitungan tahanan pentanahan mendatar mendapatkan nilai:

$$R_1 = \frac{29,6}{3,14 \cdot 0,01} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 0,01}{0,11179} \right) + \frac{1,02 \cdot 0,01}{\sqrt{0,0001}} - 5,83 \right]$$

$$= 0,501 \text{ Ohm}$$

Dengan menggunakan persamaan (3.13), perhitungan tahanan pentanahan tegak mendapatkan nilai:

$$R_2 = \frac{29,6}{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 0,01} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot 0,01}{0,01} \right) - 1 + \frac{1,02 \cdot 0,01}{\sqrt{0,0001}} \right]$$

$$(\sqrt{4 - 1})^2$$

$$= 0,8337 \text{ Ohm}$$

Dengan menggunakan persamaan (3.14), perhitungan tahanan pentanahan diantara mendatar dan tegak mendapatkan nilai:

$$R_m = \frac{29,6}{3,14 \cdot 0,01} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 0,01}{0} \right) + \frac{1,02 \cdot 0,01}{\sqrt{0,0001}} - 5,83 + 1 \right]$$

$$= 0,435 \text{ Ohm}$$

Setelah didapat nilai tahanan pembumian mendatar, tegak dan diantara keduanya, dengan menggunakan persamaan (3.15), perhitungan tahanan pentanahan total adalah:

$$R_g = \frac{0,501 \cdot 0,8337 - 0,435^2}{0,501 + 0,8337 - 2 \cdot 0,435}$$

$$= 0,44 \text{ Ohm}$$

diperoleh nilai tahanan pentanahan yang masuk dalam kriteria standar tahanan pentanahan berdasarkan IEEE-Std-80-2000 untuk pembangkit sebesar 0,5 Ohm.

4.6. Perhitungan Arus Grid Maksimum

Perhitungan arus *grid* maksimum (I_G) membutuhkan nilai arus *grid* simetris (I_g), dengan menggunakan persamaan (3.16) dibawah ini:

$$I_g = 1 \times 50,489$$

$$= 50,489 \text{ A}$$

Setelah mendapat nilai arus *grid* simetris, arus *grid* maksimum dapat dihitung menggunakan persamaan (3.17) menjadi:

$$I_G = 1 \times 1 \times 50,489$$

$$= 50,489 \text{ A}$$

4.7. Perhitungan Kenaikan Potensial Bumi

Faktor yang mempengaruhi nilai kenaikan tegangan tanah atau GPR (*Ground Potential Rise*) yaitu arus *grid* maksimum (I_G) dan tahanan pentanahan (R_g). Untuk menghitung nilai GPR menggunakan persamaan (3.18), sehingga didapatkan nilai sebagai berikut :

$$GPR = 50,489 \times 0,49$$

$$= 24,739,61 \text{ Volt}$$

Berdasarkan diagram alir pada gambar 3.1, jika nilai GPR lebih kecil dari nilai kriteria tegangan sentuh ($GPR < E_{touch}$), maka sistem pentanahan telah memenuhi standar aman. Karena nilai GPR yang didapat lebih besar dari nilai kriteria tegangan sentuh, maka dilanjutkan dengan perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya.

4.8. Perhitungan Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah Sebenarnya

Untuk menghitung tegangan sentuh (*mesh*), terlebih dahulu harus ditentukan nilai konstanta K_i dan K_m . Nilai K_i menggunakan persamaan (3.22) ialah:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot 6,79$$

$$= 1,64$$

Perhitungan untuk nilai K_m harus diperoleh terlebih dahulu nilai K_{ii} dan K_h . Dikarenakan sistem yang dirancang itu *grid* dan *rod*, maka nilai K_{ii} yang digunakan adalah 1 (dengan menggunakan batang pentanahan). Nilai K_h dihitung menggunakan persamaan (3.23) menjadi :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1,1}{1}}$$

$$= 1,44$$

Nilai K_h kemudian dimasukkan pada persamaan (3.20), sehingga diperoleh hasil di bawah ini:

$$K_m = \frac{1}{2,714} \ln \left[\frac{10^2}{16 \cdot 1,1 \cdot 0,0174} + \frac{(10+1,1)^2}{8 \cdot 10 \cdot 0,0174} \right]$$

$$+ \frac{1}{1,44} \ln \left[\frac{1}{3,14 \cdot (2,679-1)} \right]$$

$$= 0,78$$

Diperlukan juga nilai L_m , yaitu panjang efektif dari L_C+L_R untuk tegangan *mesh* satuan dalam meter, nilai tersebut didapatkan dari persamaan (3.21) sebagai berikut :

$$L_m = 850 + \left(1,55 + 1,22 \left[\frac{6}{L_C+L_R} \right] \right) 24$$

$$= 888,98 \text{ m}$$

Nilai K_i dan K_m di atas dimasukkan pada persamaan (3.19) dan diperoleh besarnya tegangan *mesh* adalah:

$$E_m = \frac{176 \times 10^4 \times 0,304 \times 1,64}{888,98}$$

$$E_m = 4330,01 \text{ Volt}$$

Hasil perhitungan didapatkan nilai tegangan sentuh (*mesh*) lebih kecil dari tegangan sentuh yang diizinkan. Berdasarkan diagram alir pada gambar 3.1, tidak perlu dilakukannya perbaikan desain, sehingga dapat berlanjut ke perhitungan tegangan langkah.

Sebelum menghitung besarnya tegangan langkah, harus diperoleh terlebih dahulu nilai konstanta K_s dengan persamaan (3.25) :

$$K_s = \frac{1}{9,14} \left(\frac{1}{2 \times 1,1} + \frac{1}{10 \times 1,1} + \frac{1}{10} [1 - 0,9^{(6,79-2)}] \right)$$

$$K_s = 0,204$$

Diperlukan juga nilai L_s , yaitu panjang efektif dari L_C+L_R untuk tegangan langkah satuan dalam meter, nilai tersebut didapatkan dari persamaan (3.26) sebagai berikut :

$$L_s = 0,78 \times 889 + 0,89 \times 24$$

$$L_s = 657,9 \text{ m}$$

Nilai K_s dan L_s di atas dimasukkan ke persamaan (3.24) bersamaan dengan nilai konstanta yang lainnya, sehingga didapatkan nilai tegangan langkah sebagai berikut

$$E_s = \frac{176 \times 10^4 \times 0,304 \times 1,64}{657,9}$$

$$E_s = 1530,23 \text{ Volt}$$

Nilai tegangan langkah di atas lebih kecil dari tegangan langkah maksimum yang

Parameter	Nilai sebenarnya	Nilai yang dibolehkan
Tahanan Pentanahan	0,49 Ω	$\leq 0,5 \Omega$
Luas Penampang Konduktor	240 mm ²	
GPR)	24.739,61 V	
Tegangan Sentuh	4330,01 V	$< 5278,40 \text{ V}$
Tegangan Langkah	1530,23 V	$< 20642,58 \text{ V}$

diizinkan. Oleh karena itu, perhitungan untuk sistem pentanahan telah selesai.

4.9. Hasil Perhitungan Pentanahan

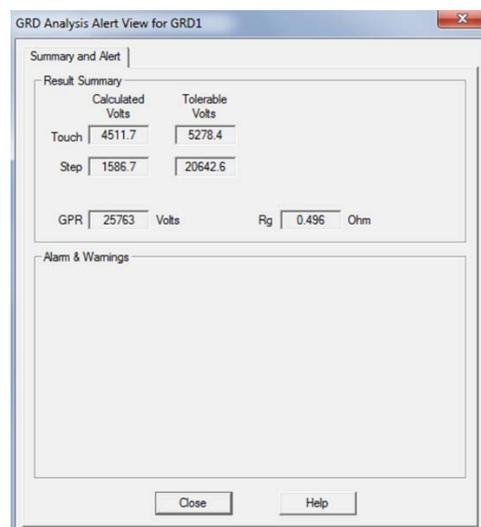
Dari perhitungan sistem pentanahan dengan desain *grid-rod* pada PLTMG Seram berkapasitas 20 MW yang telah dilakukan, maka hasil perhitungan disajikan dalam tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan sistem pentanahan PLTMG Seram 20 MW

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, nilai tahanan pentanahan yang didapat sebesar 0,49 ohm lebih kecil dari tahanan pentanahan yang diperbolehkan yaitu 0,5 ohm. Untuk nilai tegangan sentuh yang sebenarnya, yang bernilai 4330,01 volt lebih kecil dari pada tegangan sentuh yang diperbolehkan yaitu 5278,40 volt untuk berat 70 kg. Dan untuk nilai tegangan langkah yang sebenarnya, yang bernilai 1530,231 volt lebih kecil dari pada tegangan sentuh yang diperbolehkan yaitu 20642,58 volt untuk berat 70 kg. Berdasarkan IEEE Std 80 – 2000, hal ini menyatakan bahwa sistem pentanahan memenuhi fungsi untuk melindungi peralatan dan orang yang berada di sekitar lokasi pembangkit.

4.10. Simulasi dengan ETAP 12.6.0

Simulasi sistem pentanahan Grid-Rod pada ETAP 12.6.0 dengan metode IEEE ini, input datanya berdasarkan data-data yang diperoleh dari lapangan dan sesuai dengan desain yang telah dibuat, sehingga dihasilkan tegangan sentuh dan tegangan langkah seperti gambar 4.1:



Gambar 4.4 Hasil simulasi sistem pentanahan PLTMG Seram 20 MW dengan ETAP 12.6.0

Berdasarkan hasil simulasi ETAP, nilai tahanan pentanahan yang didapat sebesar 0,496 ohm lebih kecil dari tahanan pentanahan yang diperbolehkan yaitu 0,5 ohm, nilai tegangan sentuh yang sebenarnya, yang bernilai 4511,7 volt lebih kecil dari pada tegangan sentuh yang diperbolehkan yaitu 5278,4 volt untuk berat 70 kg. Dan untuk nilai tegangan langkah yang sebenarnya, yang bernilai 1586,7 volt lebih kecil dari pada tegangan sentuh yang diperbolehkan yaitu 20642,6 volt untuk berat 70 kg. Berdasarkan IEEE Std 80 – 2000, hal ini menyatakan bahwa sistem pentanahan memenuhi fungsi untuk melindungi peralatan dan orang yang berada di sekitar lokasi pembangkit.

Perbandingan hasil sistem pentanahan yang menggunakan perhitungan manual dengan hasil yang menggunakan simulasi ETAP. Nilai tahanan pentanahan antara perhitungan manual dengan simulasi ETAP memiliki selisih 1,2 %. Nilai kenaikan potensial bumi antara perhitungan manual dengan simulasi ETAP memiliki selisih 3,97 %. Nilai tegangan sentuh antara perhitungan manual dengan simulasi ETAP memiliki selisih 4,02 %. Pada nilai tegangan langkah antara perhitungan manual dengan simulasi ETAP memiliki selisih 3,55 %. Perbedaan nilai hasil dari perhitungan manual dengan hasil dari simulasi ETAP bisa terjadi karena faktor pembulatan yang digunakan penulis dalam perhitungan manual. Meskipun antara perhitungan manual dan simulasi ETAP terdapat sedikit perbedaan didalam hasilnya, hasil dari kedua cara yang telah dilakukan baik perhitungan manual dan simulasi ETAP telah memenuhi fungsi untuk melindungi peralatan dan juga manusia yang berada di sekitar lokasi pembangkit berdasarkan IEEE Std 80-2000.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan dan simulasi sistem pentanahan *grid-rod* pada pembangkit listrik tenaga mesin gas yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa :

- Ukuran *grid* 90 x 40 meter dengan jumlah konduktor paralel pada sisi panjang dan lebar masing-masing adalah $n_x = 5$ konduktor dan $n_y = 10$ konduktor
- Kedalaman penanaman konduktor *grid* sejauh 1,1 meter dari permukaan tanah

- Batang pentanahan dengan panjang 6 meter sebanyak 4 buah yang diletakkan pada sudut-sudut siku *grid*

Desain ini menghasilkan nilai tahanan pentanahan sebesar 0,49 Ohm pada perhitungan manual, dan 0,496 Ohm pada simulasi ETAP. Tegangan sentuh sebesar 4330,01 Volt pada perhitungan manual, dan 4511,7 Volt pada simulasi ETAP, nilai tegangan sentuh masih dibawah nilai tegangan sentuh kriteria 5278,40 Volt. Nilai tegangan langkah sebesar 1530,23 Volt pada perhitungan manual, dan 1586,7 Volt pada simulasi ETAP, nilai tegangan langkah masih dibawah tegangan langkah kriteria 20642,58 Volt, sistem pentanahan telah memenuhi standar aman IEEE Std. 80-2000.

DAFTAR PUSTAKA

- A, Pabla. (1994). *Sistem Distribusi Daya Listrik*, Jakarta, Indonesia : Erlangga.
- A, Syofian. (2013). Sistem Pentanahan Grid Pada Gardu Induk PLTU Teluk Sirih. *Jurnal Momentum*.
- IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std. 80-2000.
- IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power System*, IEEE Std. 142-2007.
- N. A, Dewi. (2013). Optimalisasi Rancangan Sistem Pentanahan *Grid-Rod* Pada Gardu Induk PLTP Ulubelu, Laporan Skripsi. Jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia.