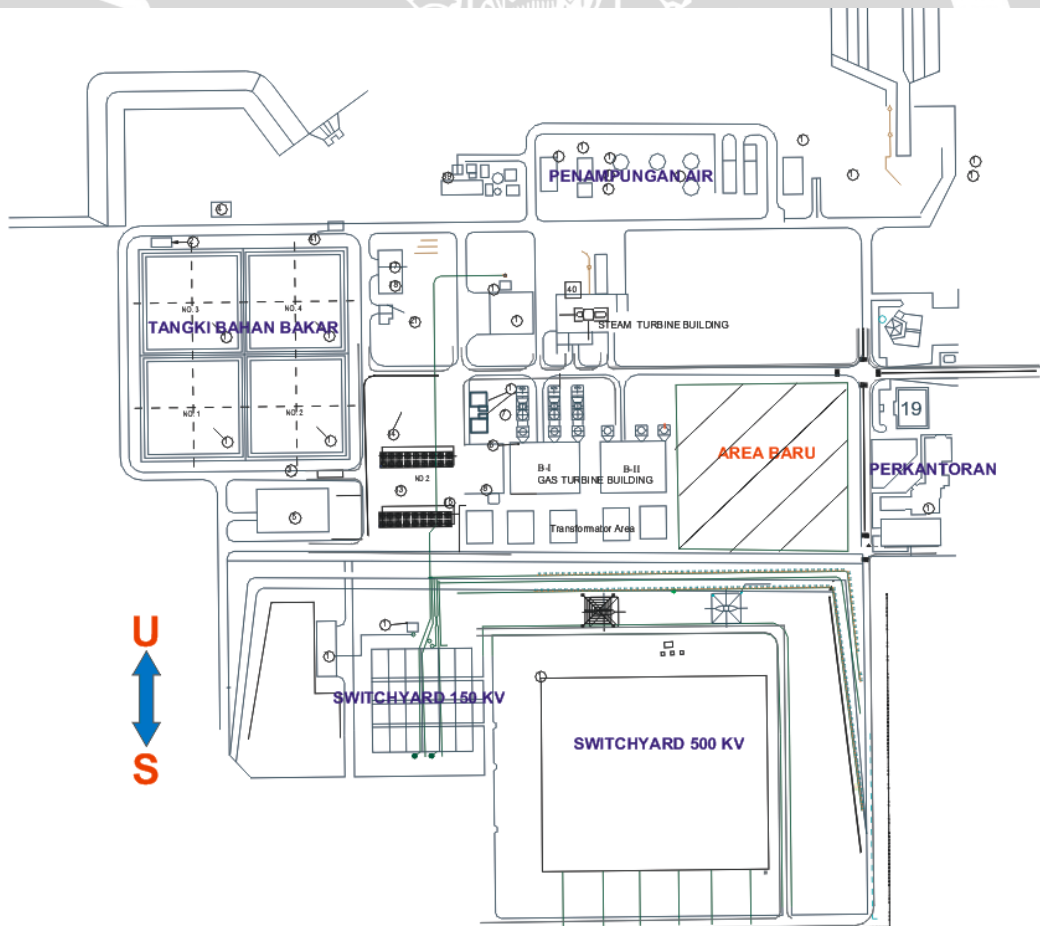


BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Identifikasi Lokasi

PT. Indonesia Power Grati terbagi menjadi beberapa area kerja yaitu area Pembangkit, area Tangki Penyimpanan Bahan Bakar, area Penampungan Air, area Perkantoran, dan area *Switchyard*. Pembagian area kerja tersebut dapat dilihat seperti Gambar 4.1. Pada area Pembangkit terdapat 2 blok pembagian Pembangkit. Blok I terdiri dari 4 Pembangkit yang terdiri dari 3 unit Pembangkit *Gas Turbine* dan 1 unit Pembangkit *Steam Turbine*. Sedangkan Blok II terdiri dari 3 unit Pembangkit *Gas Turbine*. Masing-masing Pembangkit dilengkapi Transformator Daya sebagai penaik tegangan keluaran Pembangkit sebelum ditransmisikan ke Saluran Udara Tegangan Extra Tinggi. Blok I mengirim daya ke *Switchyard* 500 KV sedangkan Blok II mengirim daya ke *Switchyard* 150 KV.



Gambar 4.1 Pembagian daerah kerja di PT. Indonesia Power Grati dan area untuk unit Pembangkit baru

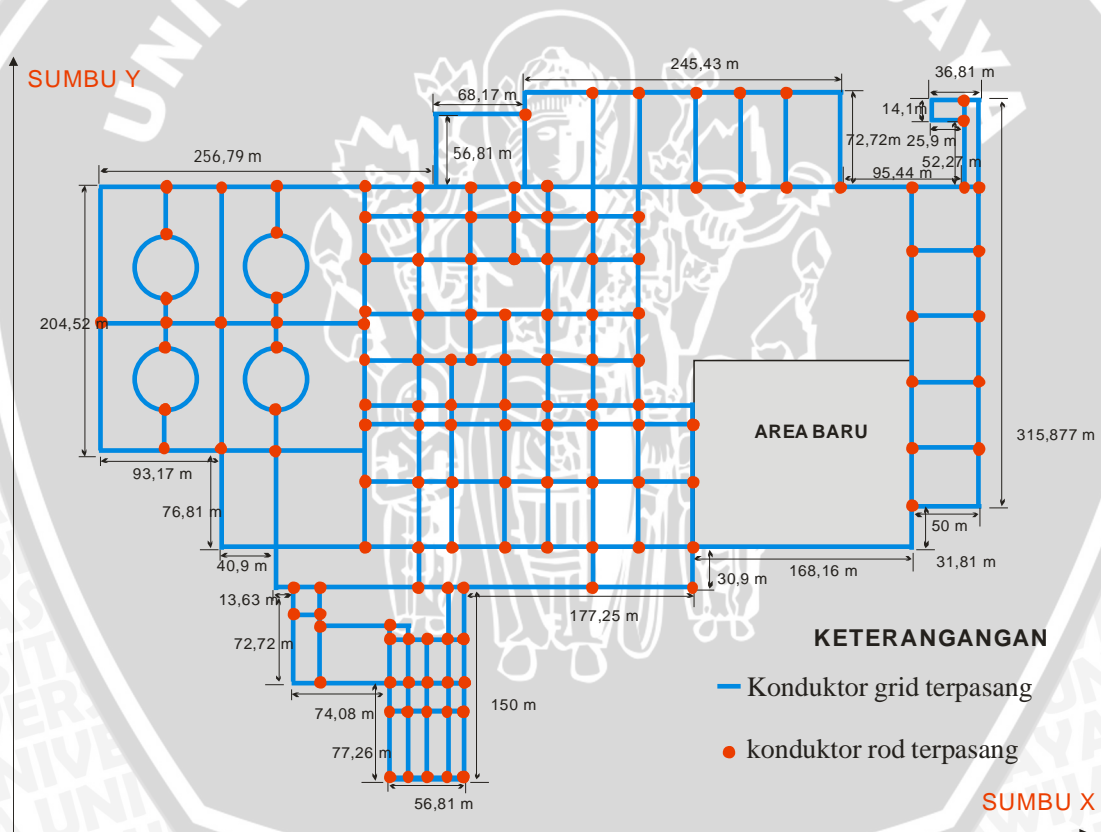
Sumber : *Site Investigasi* PLTG Grati 300 MW, Lampiran.

Pada area *Switchyard* terbagi lagi menjadi subarea *Switchyard* 500 KV dan *Switchyard* 150 KV. Pada *Switchyard* ini terdapat peralatan-peralatan proteksi seperti *Current Transformator*(CT), *Potential Transformator*(PT), *Circuit Breaker* (CB), *Disconnecting Switch*(DS), *Earthing Switch* (ES), *Busbar*, *Control Local Panel*, dan peralatan-peralatan proteksi lainnya.

Penambahan 1 unit Pembangkit Tenaga Gas beserta Transformator Dayanya akan diletakkan pada area seluas 24618,5 meter² yang terletak disamping Blok II seperti diperlihatkan pada Gambar 4.1.

4.2 Sistem Pengetanahan yang Sudah Terpasang di PT. Indonesia Power Grati

Desain sistem pengetanahan yang sudah terpasang di PT. Indonesia Power Grati ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Detail desain sistem pengetanahan yang sudah terpasang

Sumber : Desain manual PT. PLN Grati, 6.13-57

Pada Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa sistem pengetanahan peralatan pada PT. Indonesia Power Grati yang sudah terpasang melingkupi hampir seluruh area kerja. Sistem pengetanahan peralatan tersebut memiliki desain yang sedikit berbeda pada setiap area kerja. Pada area penyimpanan bahan bakar desain konduktor sistem

pengetanahan mengikuti bentuk tangki. Hal ini disebabkan konduktor yang mengelilingi tangki tersebut digunakan sebagai koneksi konduktor penyalur ke tanah dari finial penangkap petir. Kemudian pada *Switchyard* 150 KV jarak antar konduktor menyesuaikan peralatan-peralatan proteksi pada area tersebut. Untuk *Switchyard* 500 KV sistem pengetanahannya belum terkoneksi dengan sistem pengetanahan yang lainnya sehingga pada pembahasan pada skripsi ini tidak diikutsertakan.

Detail desain sistem pengetanahan peralatan yang sudah terpasang di PT. Indonesia Power Grati dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Detail sistem pengetanahan peralatan yang sudah terpasang

No.	Data Desain	Keterangan
1.	Luas daerah yang dilingkupi sistem pengetanahan (A)	152800 meter ²
2.	Jumlah rod (n_r)	116 buah
3.	Panjang tiap konduktor rod (L_r)	6 meter
4.	Total panjang konduktor rod (L_R)	696 meter
5.	Total panjang konduktor horisontal/grid (L_G)	9820 meter
6.	Panjang total konduktor pengetanahan (L_T)	10516 meter
7.	Jarak paralel antar konduktor terbesar (D_{mak})	135,5 meter
8.	Jarak paralel antar konduktor terkecil (D_{min})	12,7 meter
9.	Panjang grid terbesar sumbu x (L_x)	683,4 meter
10.	Panjang grid terbesar sumbu y (L_y)	534 meter
11.	Tahanan jenis permukaan material (lapisan batu koral) (ρ_s)	3000 Ω -meter
12.	Ketebalan permukaan material (h_s)	0,1 meter
13.	Kedalaman penanaman konduktor grid (h)	1 meter
14.	Jenis Konduktor	Tembaga
15.	Diameter konduktor (d)	0,018 meter

Sumber : Desain manual PT. PLN Grati, 6.13-15 sampai 6.13-16, 6.13-52

Perhitungan arus gangguan ini bertujuan untuk mengetahui berapa nilai arus gangguan setelah adanya penambahan unit pembangkit baru. Analisis arus gangguan ke tanah dilakukan dengan menggunakan asumsi bahwa Pemutus Tenaga / *Circuit Breaker* (CB) yang menghubungkan *Switchyard* ke sistem jaringan yang lain dihubung-buka ketika gangguan terjadi. Koordinasi *Circuit Breaker* yang terdapat pada *Switchyard* tersebut diasumsikan memiliki respon pemutusan beban yang sangat cepat terhadap arus gangguan sehingga komponen urutan pada sistem jaringan dan pembangkit lain dapat diabaikan..

Berdasarkan standar IEEE perhitungan tegangan sentuh dan langkah terbesar didasarkan diantara arus gangguan 1 fasa ke tanah dan 2 fasa ke tanah. Pada pembahasan di skripsi ini, arus gangguan yang digunakan adalah arus gangguan terbesar diantara titik-titik gangguan. Hasil perhitungan arus gangguan untuk 1 fasa ke tanah dan 2 ke tanah di setiap titik ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai arus gangguan 1 fasa ke tanah dan 2 fasa ketanah pada setiap titik-titik gangguan

TITIK GANGGUAN	ARUS GANGGUAN (A)	
	1 ϕ - G	2 ϕ - G
1 _A	564,482	286,985
2.1 _A	549,567	284,569
2.2 _A	549,567	284,569
3 _A	550,309	284,623
4.1 _A	547,520	284,419
4.2 _A	547,520	284,419
5 _A	548,498	284,490
6 _A	570,460	287,790
B ₅₀₀	6226,402	8458,425
B ₁₅₀	4477,439	5772,596

Sumber : Galuh,2013:50

Dari Tabel 4.2 tersebut dapat dilihat bahwa nilai arus gangguan terbesar untuk 1 fasa ke tanah sebesar 6226,402 A pada titik B500. Sedangkan arus gangguan terbesar

untuk 2 fasa ke tanah adalah sebesar 8458,425 A pada titik B500. Karena arus gangguan 2 fasa ke tanah lebih besar dibandingkan arus gangguan 1 fasa ke tanah maka arus gangguan sebesar 8458,425 A yang akan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan tegangan sentuh (E_t) dan tegangan langkah (E_s) terbesar pada sistem pengetanahan yang sudah terpasang.

4.4 Analisis Tahanan Jenis Tanah

Pengukuran tahanan jenis tanah pada luas daerah yang akan direncanakan dilingkupi sistem pengetanahan dilakukan menggunakan metode geolistrik. Pengukuran ini juga dilakukan di sebagian area yang sudah dilingkupi sistem pengetanahan peralatan. Pengukuran tersebut dilakukan oleh tim survey topografi dan penyelidikan lapangan PLTGU Grati yang bekerjasama dengan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Pengukuran dilakukan di 6 titik yang berbeda. Gambar 4.4 di bawah ini merupakan lokasi pengukuran geolistrik.

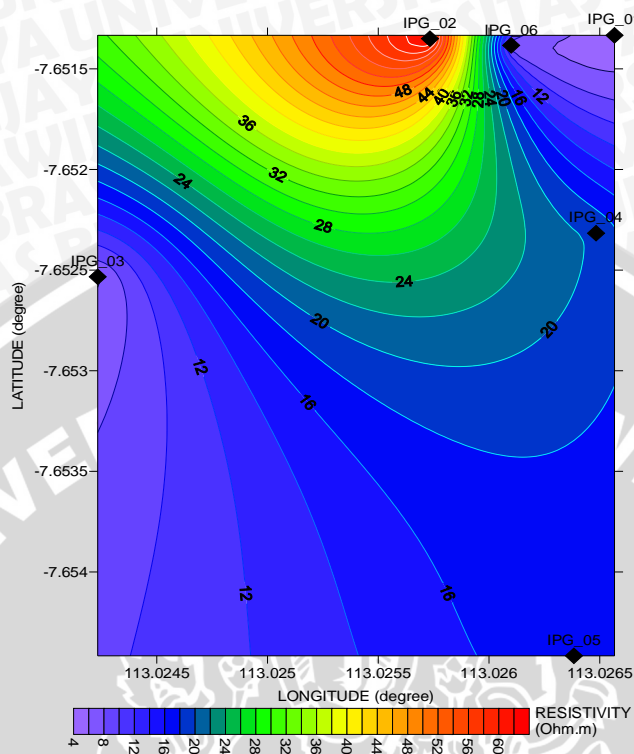


Gambar 4.4 Distribusi titik ukur geolistrik tahanan jenis tanah

Sumber : Laporan investigasi PLTG Grati 300 MW, 2013:V-6

Hasil pengukuran menggunakan metode geolistrik telah didapat data hasil pengukuran tahanan jenis tiap lapisan tanah hingga kedalaman 50 m dalam bentuk lembaran kurva-kurva *iso-resistivity*. Contoh hasil pengukuran tahanan jenis tanah

menggunakan metode geolistrik pada kedalaman 5 meter ditunjukkan pada Gambar 4.5. Hasil pengukuran geolistrik di setiap kedalaman secara lengkap ditunjukkan pada Lampiran 3.



Gambar 4.5 Kurva-kurva *iso-resistivity* dari hasil pengukuran geolistrik
 Sumber : Laporan investigasi PLTG Grati 300 MW, Lampiran Geolistrik

Seperti terlihat pada Gambar 4.5 hasil pengukuran tahanan jenis tanah menggunakan metode geolistrik menghasilkan kurva-kurva *iso-resistivity* dengan warna yang berbeda. Setiap warna mempresentasikan nilai tahanan jenis setiap lapisan tanah dalam sumbu horisontal. Untuk mendapatkan sebuah nilai tahanan jenis tanah yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan dalam penentuan desain sistem pengetanahan, maka dicari nilai rata-rata tahanan jenis tanah setiap lembaran hasil pengukuran geolistrik maupun nilai rata-rata volume setiap kedalaman.

4.4.1 Nilai Rata-Rata Tahanan Jenis Tanah Setiap Lembaran Hasil Pengukuran Geolistrik

Perhitungan nilai rata-rata tahanan jenis tanah dilakukan setiap lembaran hasil pengukuran geolistrik. Total ada 11 lembaran kurva-kurva *iso-resistivity* pada kedalaman 0 sampai 50 meter. Contoh perhitungan untuk mencari nilai rata-rata tahanan jenis tanah ditunjukkan pada lembaran untuk kedalaman 5 meter yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Untuk kedalaman 5 meter didapat 15 lapisan tahanan jenis tanah yang berbeda pada

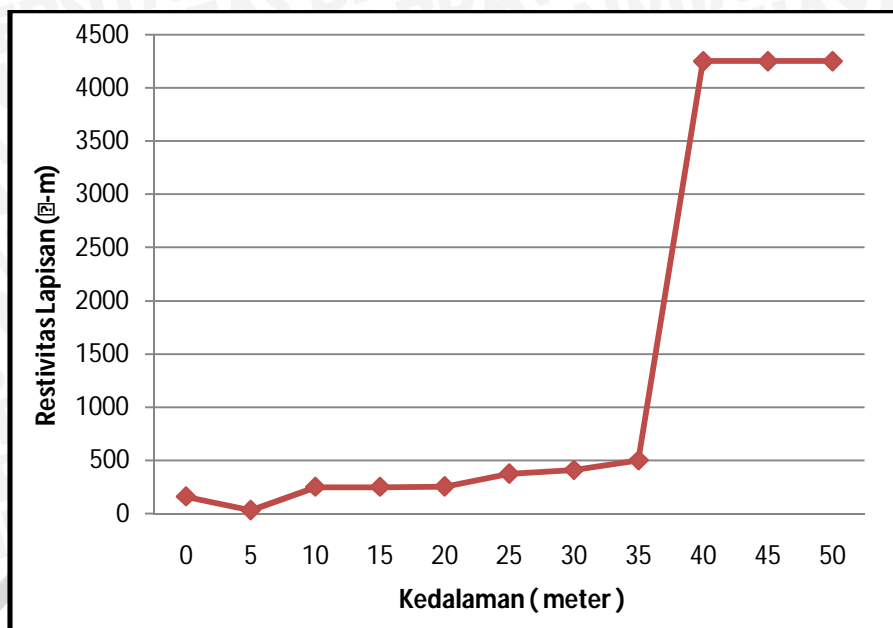
kurva isoresistivity dengan nilai 4 Ω -m, 8 Ω -m, 12 Ω -m, 18 Ω -m, 20 Ω -m, 24 Ω -m, 28 Ω -m, 32 Ω -m, 36 Ω -m, 40 Ω -m, 44 Ω -m, 48 Ω -m, 52 Ω -m, 56 Ω -m dan 60 Ω -m. Sehingga nilai rata-rata tahanan jenis pada kedalaman 5 meter adalah 32,1 Ω -m. Pada Tabel 4.3 ini diberikan nilai rata-rata dari tahanan jenis lapisan pada setiap lembaran kedalaman pengukuran.

Tabel 4.3 Tahanan jenis pada setiap kedalaman

No	Kedalaman (meter)	Tahanan jenis Rata-rata (Ω -m)
1	0	160
2	5	32,1
3	10	250
4	15	250
5	20	253,8
6	25	375
7	30	409,4
8	35	500
9	40	4250
10	45	4250
11	50	4250

Dengan menggunakan data dari Tabel 4.3, kemudian dibuat grafik tahanan jenis tiap lapisan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Pada Gambar 4.6 merupakan grafik tahanan jenis setiap lapisan tanah untuk kedalaman hingga 50 meter dari hasil pengukuran geolistrik di lapangan. Grafik ini menunjukkan bahwa tahanan jenis tanah bervariasi dengan kedalaman. Nilai tahanan jenis lapisan tanah meningkat dengan peningkatan kedalaman, bahkan nilainya melonjak tajam mulai dari kedalaman 40 meter.

Grafik tahanan jenis pada Gambar 4.6 menggambarkan ada beberapa lapisan yang menunjukkan nilai tahanan jenis yang sama, yaitu pada kedalaman antara 10 sampai 15 meter dengan tahanan jenis rata-rata sebesar 250 Ω -m, dan 40 sampai 50 meter dengan tahanan jenis rata-rata melonjak sebesar 420 Ω -m.



Gambar 4.6 Nilai tahanan jenis tanah rata-rata pada setiap kedalaman hingga kedalaman 50 m

4.4.2 Nilai Tahanan Jenis Tanah Rata-Rata Volume

Untuk perhitungan resistansi pengetanahan peralatan dibutuhkan nilai tahanan jenis volume. Untuk itu perlu diketahui nilai rata-rata tahanan jenis volume pada kedalaman tertentu. Nilai tahanan jenis volume pada setiap kedalaman dapat ditentukan berdasarkan Tabel 4.3 yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Tahanan jenis volume setiap kedalaman tanah

No.	Kedalaman (meter)	Tahanan jenis Rata-rata (Ω -m)
1	0 - 5	96
2	0 - 10	147,4
3	0 - 15	173
4	0 - 20	189,2
5	0 - 25	220,2
6	0 - 30	247,2
7	0 - 35	278,8
8	0 - 40	720
9	0 - 45	1073
10	0 - 50	1361,8

Pada Tabel 4.4, nilai rata-rata tahanan jenis volume $96 \Omega\text{-m}$ pada kedalaman 5 meter atau 0 sampai 5 meter dari Tabel 4.3 diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata resistivitas lapisan 0 meter dan 5 meter dari Tabel 4.3. Sedangkan nilai resistansi volume $189,2 \Omega\text{-m}$ pada kedalaman 20 meter 0 sampai 20 meter dari Tabel 4.3 diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata resistivitas lapisan 0 meter, 5 meter, 10 meter, 15 meter, dan 20 meter dari Tabel 4.3.

Dari Tabel 4.4 resistivitas volume ini menunjukkan kenaikan nilai apabila kedalamannya meningkat. Dari kedalaman 0 meter, nilai resistansi volume rata-rata naik hingga mencapai $279 \Omega\text{-m}$ pada kedalaman 35 m dan setelah ini nilainya melonjak tajam hingga mencapai sekitar $1362 \Omega\text{-m}$ pada kedalaman 50 m.

4.4.3 Penentuan Model Lapisan Tanah Untuk Seluruh Area di PT. Indonesia Power Grati

Dari Tabel 4.4 resistivitas volume dapat dimodelkan sebagai tanah heterogen dengan dua lapisan. Lapisan pertama adalah lapisan tanah hingga kedalaman 35 meter dan lapisan kedua adalah lapisan dengan kedalaman lebih dari 35 meter. Penentuan model ini berdasarkan perbedaan resistivitas volume yang sangat besar diantara lapisan tanah hingga kedalaman 35 meter dan resistivitas volume dengan kedalaman lebih dari 35 meter.

Dengan model tanah heterogen seperti ini dengan lapisan atas memiliki resistivitas tanah lebih kecil dari lapisan tanah dibawahnya, maka akan mempengaruhi distribusi arus gangguan yang mengalir ke tanah. Arus gangguan ke tanah akan lebih banyak mengalir ke bagian lapisan pertama dari pada ke bagian lapisan kedua. Oleh karena itu penanaman elektroda pentanahan (*rod* dan *mesh/grid*) maksimum hanya sampai kedalaman 35 meter. Namun karena kondisi tanah dan batuan yang memiliki karakteristik tahanan jenis tanah yang meningkat pada setiap kedalaman maka penanaman konduktor untuk perencanaan sistem pengetanahan yang paling efektif tidak sampai melebihi kedalaman 5 meter. Penggunaan konduktor *rod* juga dinilai kurang efektif mengingat nilai tahanan jenis tanah yang semakin meningkat disetiap kedalaman. Penggunaan konduktor *rod* tidak banyak menurunkan nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah. Maka dari itu desain sistem pengetanahan peralatan yang akan direncanakan hanya menggunakan penanaman konduktor secara horisontal saja (*grid*).

4.5 Analisis Penentuan Desain Sistem Pengetanahan Peralatan Untuk Unit Pembangkit Baru

Dari data-data yang didapat akan digunakan untuk menentukan desain sistem pengetanahan peralatan untuk unit pembangkit baru. Langkah-langkah dalam penentuan desain sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru yang sesuai yaitu sebagai berikut.

4.5.1 Evaluasi Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah Pada Sistem Pengetanahan Yang Sudah Terpasang

Evaluasi ini dilakukan untuk mengetahui tegangan sentuh dan tegangan langkah terbesar yang terjadi pada sistem pengetanahan peralatan yang sudah terpasang pada PT. Indonesia Power Grati ketika kondisi gangguan setelah adanya pembangkit baru yang terkoneksi dengan pembangkit lama. Tegangan sentuh dan langkah yang terjadi tersebut apakah masih memenuhi persyaratan keamanan dan keselamatan dengan membandingkan dengan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan. Panjang konduktor minimum untuk desain sistem pengetanahan peralatan untuk unit pembangkit baru akan dapat ditentukan terlebih dahulu apabila tegangan sentuh dan tegangan langkah yang terjadi melebihi dari tegangan yang diijinkan.

1. Tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan

Tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan bergantung pada waktu gangguan (t_f) dan ketebalan lapisan batu koral (h_s). Ketebalan lapisan batu koral sesuai data spesifikasi sistem pengetanahan pada Tabel 4.1 yaitu 0,1 meter.

Untuk waktu gangguan sangat bergantung pada Pemutus Tenaga dan Rele yang digunakan di masing-masing Pembangkit. Pada data Desain Manual dari sistem pengetanahan yang terpasang waktu pemutusan gangguan dipilih sebesar 0,24 detik. Tetapi karena pemilihan waktu tersebut diluar dari nilai yang ditetapkan oleh Hutauruk dan IEEE maka waktu pemutusan gangguan dipilih ulang berdasarkan standar-standar yang ada (Hutauruk dan IEEE). Berdasarkan persamaan 2.16 dan 2.17 serta 2.30 dan 2.31, semakin lama pemilihan waktu pemutusan gangguan maka tegangan sentuh dan langkah yang diijinkan semakin rendah. Demi meningkatkan faktor keamanan dan keselamatan waktu pemutusan tenaga diambil yang tertinggi diantara standar yang diterapkan oleh Hutauruk dan IEEE yaitu sebesar 1 detik.

Perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan menggunakan Persamaan 2.16 sampai 2.17 serta Persamaan 2.30 dan Persamaan 2.31 yaitu sebagai berikut :

Faktor reduksi dari nilai tahanan jenis permukaan tanah dapat dihitung dari Persamaan 2.18. Ketebalan batu koral (h_s) dan tahanan jenis batu koral (ρ_s) dapat dilihat pada Tabel 4.1. Berdasarkan Tabel 4.1 tersebut juga diketahui penanaman konduktor grid sedalam 1 meter dan panjang konduktor rod 6 meter sehingga total kedalaman penanaman konduktor sedalam 7 meter. Maka tahanan jenis tanah (ρ) untuk penanaman konduktor 7 meter seperti terlihat pada Tabel 4.1 adalah 147,4 Ω -m.

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

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot (1 - (\frac{147,4}{3000}))}{2 \cdot 0,1 + 0,09}$$

$$= 0,705$$

Tegangan sentuh yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg dan 70 kg yang diijinkan dapat dihitung dengan Persamaan 2.16 dan Persamaan 2.17 yaitu sebagai berikut.

$$E_{t50} = (1000 + 1,5 C_s \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 1,5 \cdot 0,705 \cdot 3000) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{1}}$$

$$= 484 \text{ volt}$$

$$E_{t70} = (1000 + 1,5 C_s \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 1,5 \cdot 0,705 \cdot 3000) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{1}}$$

$$= 655 \text{ volt}$$

Tegangan langkah yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg dan 70 kg dapat dihitung dengan Persamaan 2.30 dan Persamaan 2.31 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 E_{s50} &= (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_f}} \\
 &= (1000 + 6 \cdot 0,705 \cdot 3000) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{1}} \\
 &= 1587,8 \text{ volt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{s70} &= (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_f}} \\
 &= (1000 + 6 \cdot 0,705 \cdot 3000) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{1}} \\
 &= 2149 \text{ volt}
 \end{aligned}$$

Karena tegangan langkah dan tegangan sentuh yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg lebih rendah dibandingkan orang dengan berat badan 70 kg maka batas tegangan yang digunakan dalam perhitungan adalah 484 volt untuk tegangan sentuh dan 1587,8 volt untuk tegangan langkah.

2. Tegangan sentuh (E_t) dan langkah terbesar (E_s)

Data yang digunakan untuk perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah terbesar berdasarkan data-data yang sudah diketahui. Perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah terbesar yaitu sebagai berikut.

Sistem pengetanahan yang terdapat pada PT. Indonesia Power Grati memiliki bentuk tidak beraturan. Nilai n_a , n_b , n_c , dan n_d dapat dihitung dengan Persamaan 2.25 sampai Persamaan 2.28 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 n_a &= \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \\
 &= \frac{2 \cdot 9820}{2434,775} \\
 &= 8,07
 \end{aligned}$$

Dengan

$$L_p = (L_x + L_y) \cdot 2 = (683,35 + 534,0375) \cdot 2 = 2434,775 \text{ meter}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{2 \cdot \sqrt{A}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2434,775}{2 \cdot \sqrt{152800}}}$$

$$= 1,25$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0,7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}}$$

$$= \left[\frac{683,35 \cdot 534,0375}{152800} \right]^{\frac{0,7 \cdot 152800}{683,35 \cdot 534,0375}}$$

$$= 1,3$$

$$n_d = \frac{D_{maks}}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

$$= \frac{135,5}{\sqrt{683,35^2 + 534,0375^2}}$$

$$= 0,16$$

Jadi jumlah konduktor paralel efektif (n) dapat dihitung dengan Persamaan 2.24 yaitu sebagai berikut.

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

$$= 8,07 \cdot 1,25 \cdot 1,3 \cdot 0,16$$

$$= 2,03$$

Faktor geometri (K_m) dihitung dengan Persamaan 2.20 yaitu sebagai berikut.

$$K_{ii} = 1$$

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

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

$$= 1,414$$

$$\begin{aligned}
 K_m &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{(D_{maks})^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{((D_{maks} + 2 \cdot h)^2)}{8 \cdot D_{maks} \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{135,5^2}{16 \cdot 1 \cdot 0,018} + \frac{(135,5 + 2,1)^2}{8 \cdot 135,5 \cdot 0,018} - \frac{1}{4 \cdot 0,018} \right] + \frac{1}{1,414} \cdot \\
 &\quad \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot 2,03 - 1)} \right] \\
 &= 1,74
 \end{aligned}$$

Faktor ketidakmerataan kerapatan arus (K_i) dapat dihitung dengan Persamaan 2.23 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 K_i &= 0,644 + 0,148 \cdot n \\
 &= 0,644 + 0,148 \cdot 2,03 \\
 &= 0,944
 \end{aligned}$$

Penanaman konduktor efektif (L_M) dapat dihitung dengan Persamaan 2.29 yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 L_M &= L_C + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \\
 &= 9820 + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{6}{\sqrt{683,35^2 + 534,0375^2}} \right) \right] \cdot 696 \\
 &= 10904,67 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

Dengan tahanan jenis tanah (ρ) untuk penanaman konduktor 7 meter sebesar 147,4 Ω -m dan arus gangguan terbesar (I_F) sebesar 8458,425 A, sehingga tegangan sentuh (E_t) yang terjadi dapat dihitung dengan Persamaan 2.19 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 E_t &= \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_F}{L_M} \\
 &= \frac{147,4 \cdot 1,74 \cdot 0,944 \cdot 8458,425}{10904,67} \\
 &= 187,8 \text{ volt}
 \end{aligned}$$

Jadi tegangan sentuh terbesar (E_t) yang terjadi 187,8 volt lebih rendah dari tegangan sentuh yang dizinkan yaitu sebesar $E_{t50} = 484$ volt

Faktor geometri K_s dapat dihitung dengan Persamaan 2.35 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} K_s &= \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D_{min} + h} + \frac{1}{D_{min}} (1 - 0,5^{n-2}) \right) \\ &= \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \cdot 1} + \frac{1}{12,7 + 1} + \frac{1}{12,7} \cdot (1 - 0,5^{2,03-2}) \right) \\ &= 0,184 \end{aligned}$$

Penanaman konduktor efektif (L_s) dapat dihitung dengan Persamaan 2.33 yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} L_s &= 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \\ &= 0,75 \cdot 9820 + 0,85 \cdot 696 \\ &= 7956,6 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tegangan langkah (E_s) yang terjadi dapat dihitung dengan Persamaan 2.32 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_F}{L_s} \\ &= \frac{147,4 \cdot 0,184 \cdot 0,944 \cdot 8458,425}{7956,6} \\ &= 27,2 \text{ volt} \end{aligned}$$

Jadi tegangan sentuh terbesar (E_s) yang terjadi 27,2 volt, lebih rendah dari tegangan sentuh yang dizinkan sebesar $E_{s50} = 1587,8$ volt.

Dari hasil perhitungan, tegangan sentuh maupun tegangan langkah terbesar pada sistem pengetanahan yang sudah terpasang ternyata masih memenuhi persyaratan karena masih dibawah dari nilai tegangan sentuh dan langkah yang diijinkan. Oleh karena itu, tidak batasan panjang konduktor minimum yang harus ditambahkan pada sistem pengetanahan yang sudah terpasang akibat perubahan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang disebabkan oleh penambahan Pembangkit baru.

4.5.2 Perhitungan Untuk Menentukan Diameter Konduktor Pengetanahan

Jenis konduktor yang akan digunakan untuk desain sistem pengetanahan peralatan untuk unit pembangkit baru adalah konduktor tembaga berlilit tipe *hard-drawn*. Konduktor tembaga tipe ini dibuat dengan cara diperkeras dengan jalan ditarik.

Berdasarkan Tabel 2.2 mengenai berbagai jenis material, konduktor tipe *hard-drawn* memiliki konduktivitas sebesar 97 %, koefisien panas tahanan jenis (α_r) sebesar 0,00381 pada 1/ °C, koefisien panas tahanan jenis sebesar (K_o) 242 °C, suhu terbesar konduktor tembaga yang diijinkan (T_m) sebesar 1084 °C , tahanan jenis konduktor (ρ_r) sebesar 1,78 $\mu\Omega$ -cm, dan kapasitas panas per unit volume ($TCAP$) sebesar 3,42 J/(cm³ · °C).

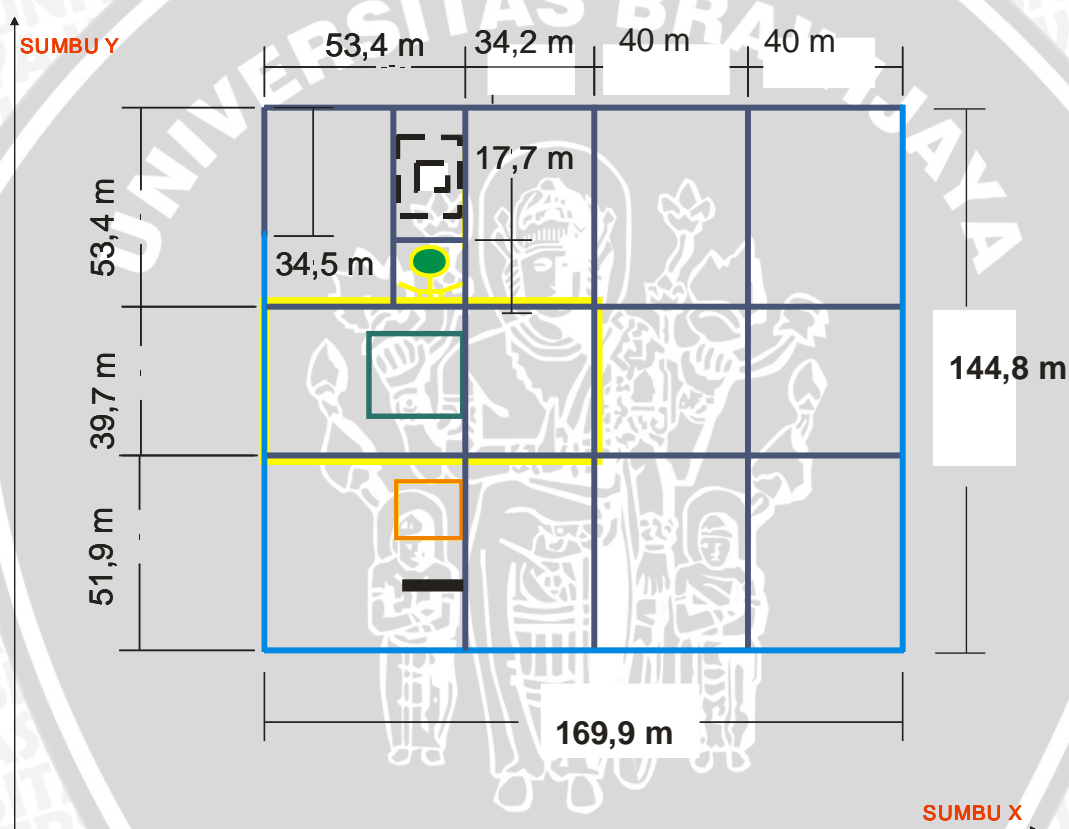
Untuk menentukan ukuran konduktor pengetanahan minimum diperlukan temperatur tahunan lingkungan terbesar (T_a). Dari sampel data temperatur lingkungan yang diambil selama 10 tahun (2002-2011) didaerah grati didapat temperatur tahunan terbesar pada tahun 2003 dengan suhu 35,5 °C. Dengan waktu pemutusan arus gangguan (t_f) sebesar 1 detik dan arus gangguan (I_F) sebesar 8458,425 A luas penampang minimum konduktor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.14 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} A_{mm^2} &= I_F \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_f \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}} \\ &= 8458,425 \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3,42 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 0,00381 \cdot 1,78}\right) \ln\left(\frac{242+1084}{242+35,5}\right)}} \\ &= 30,1 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas penampang konduktor tersebut harus disesuaikan dengan luas konduktor yang ada di pasaran. Mengacu pada produk yang dikeluarkan oleh perusahaan General Cable (Spesifikasi produk secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 5), luas penampang konduktor dipilih sebesar 35 mm² dan dengan diameter (d) nominal sebesar 7,7 mm.

4.5.3 Desain Sistem Pengetanahan Peralatan untuk Unit Pembangkit Baru

Berdasarkan evaluasi tegangan sentuh dan tegangan langkah pada sistem pengetanahan peralatan yang sudah terpasang terhadap arus gangguan akibat penambahan unit Pembangkit baru, menunjukkan nilai tegangan sentuh dan langkah yang terjadi dibawah dari nilai tegangan yang diijinkan. Hal tersebut berarti tidak ada ketentuan panjang konduktor minimum yang harus ditambahkan pada desain sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru. Sehingga panjang konduktor pengetanahan yang dibutuhkan berdasarkan desain tata letak peralatan-peralatan yang ada pada unit Pembangkit baru.

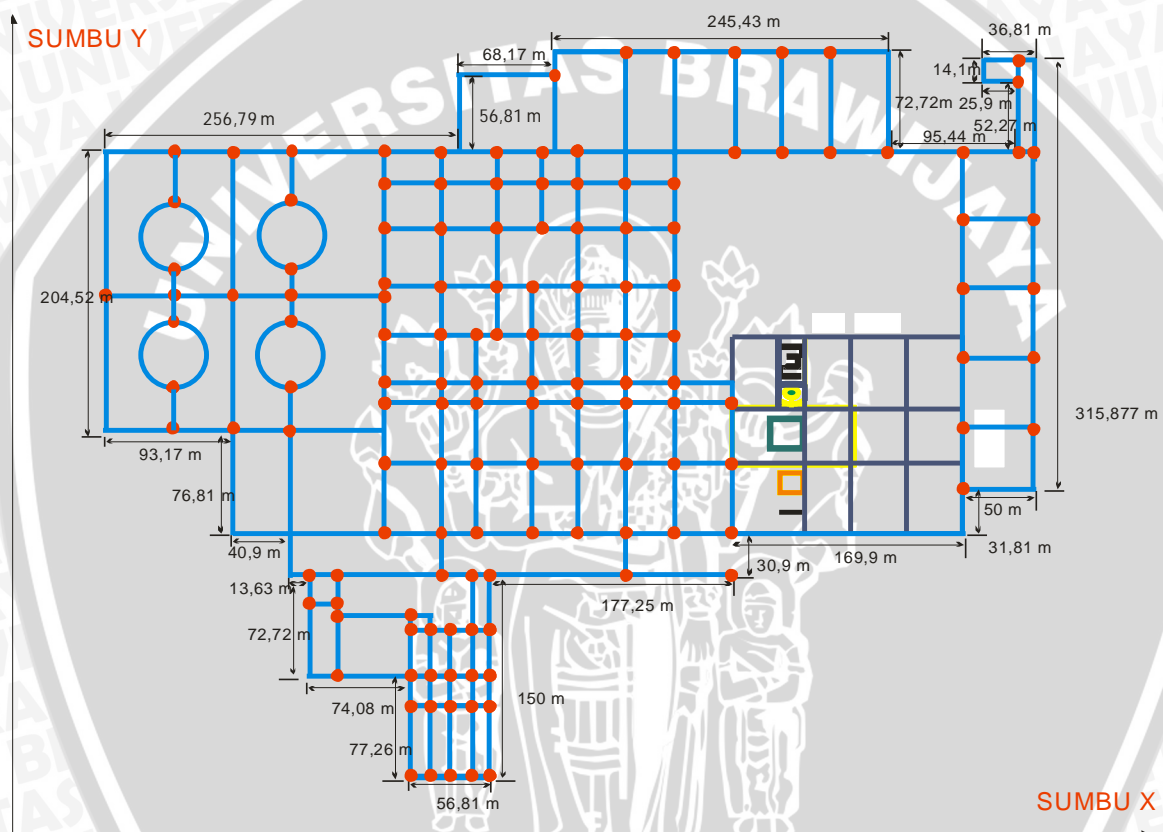


KETERANGAN

- Konduktor grid baru
- Konduktor grid terpasang
- Gedung
- Tansformator baru
- Pembangkit baru
- Cerobong asap
- - HRSG
- Circuit Breaker

Gambar 4.7 Detail desain sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru

Penentuan desain sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru berdasarkan desain tata letak peralatan-peralatan pada unit Pembangkit baru tersebut. Untuk detail desain dan tata letak peralatan yang ada pada unit Pembangkit baru dapat dilihat pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.7, desain sistem pengetanahan peralatan yang ditunjukkan hanya pada area unit Pembangkit baru saja. Apabila desain tersebut digabung dengan sistem pengetanahan yang sudah terpasang, desain sistem pengetanahan peralatan secara keseluruhan pada PT. Indonesia Power Grati ditunjukkan pada Gambar 4.8



Gambar 4.8 Detail desain sistem pengetanahan peralatan PT. Indonesia Power Grati setelah adanya sistem pengetanahan peralatan baru.

Sistem pengetanahan peralatan yang akan digunakan pada area untuk unit Pembangkit baru menggunakan sistem pengetanahan peralatan jenis *grid* tanpa konduktor *rod*. Hal tersebut dikarenakan dari analisis tahanan jenis tanah didapatkan bahwa semakin dalam kedalaman tanah nilai tahanan jenis tanah semakin meningkat sehingga penggunaan konduktor *rod* menjadi tidak efektif. Penggunaan konduktor *rod* tidak akan menurunkan secara signifikan nilai dari tegangan sentuh dan tegangan langkah yang terjadi.

Kedalaman penanaman konduktor *grid* pada kedalaman 1 meter dari permukaan tanah. Alasan utama kedalaman ini dipilih agar sistem pengetanahan peralatan baru ini dapat dikoneksikan pada sistem pengetanahan yang sudah terpasang.

Panjang konduktor keseluruhan yang digunakan pada sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru ini adalah sebesar 1051,2 meter. Jarak antar konduktor pengetanahan bergantung pada tata letak peralatan-peralatan di unit Pembangkit baru. Konduktor pengetanahan harus ditanam pada lokasi yang strategis agar semua peralatan yang terbuat dari metal dapat dengan mudah diketanahkan. Misalnya saja pada Transformator, konduktor pengetanahan harus ditanam di dekat Transformator tersebut. Dengan penanaman konduktor yang berada di dekat Transformator, maka bodi Transformator yang terbuat dari metal dapat dengan mudah diketanahkan dengan menghubungkan bodi Transformator dengan konduktor pengetanahan. Selain itu, titik netral Transformator juga dapat dengan mudah dikoneksikan pada konduktor pengetanahan.

Pembangkit baru direncanakan akan diletakkan didalam ruangan. Gedung yang akan digunakan sebagai tempat Pembangkit baru ditunjukkan dengan garis kuning seperti terlihat pada Gambar 4.7. Di dalam gedung tersebut tidak hanya Pembangkit saja yang perlu diketanahkan, tetapi ada beberapa peralatan kontrol yang terbuat dari metal perlu diketanahkan juga. Di dalam skripsi ini, tata letak peralatan-peralatan kontrol tidak dibahas. Penanaman konduktor diletakkan di sisi dalam gedung dan menyesuaikan lebar dan panjang dari gedung tersebut. Menyesuaikan dari desain unit Pembangkit yang sudah terpasang, lapisan batu koral tetap digunakan di dalam gedung tersebut.

Konduktor pengetanahan juga ditanam melingkupi cerobong asap dan HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*). Hal tersebut dikarenakan pada cerobong asap dan HRSG juga terdapat peralatan-peralatan yang terbuat dari metal yang perlu diketanahkan. Khusus untuk cerobong asap, konduktor pengetanahan peralatan dan konduktor pengetanahan untuk pengetanahan dari *finial* penangkap petir didesain secara terpisah. Di dalam skripsi ini yang dibahas secara detail hanya konduktor pengetanahan peralatan cerobong saja.

Pada Gambar 4.7, terlihat ada area kosong di samping gedung. Untuk meratakan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang terjadi, jarak antar konduktor paralel pada area kosong tersebut disesuaikan agar tidak ada jarak konduktor yang terlalu besar.

Ketebalan batu koral akan mempengaruhi nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan. IEEE merekomendasikan ketebalan batu koral antara 0,08

sampai 0,15 meter. Dengan mengacu pada Tabel 4.4 nilai tahanan jenis tanah untuk kedalaman penanaman konduktor sedalam 1 meter yaitu sebesar $96 \Omega\cdot\text{m}$. Waktu pemutusan gangguan disesuaikan dengan pengambilan waktu pemutusan gangguan pada sistem pengetanahan yang sudah terpasang yaitu sebesar 1 detik. Faktor reduksi dari nilai tahanan jenis permukaan tanah untuk ketebalan lapisan batu koral 0,08 meter dapat dihitung dari Persamaan 2.18.

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

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \left(\frac{96}{3000}\right)\right)}{2 \cdot 0,08 + 0,09}$$

$$= 0,651$$

Tegangan sentuh yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg dan 70 kg yang diijinkan dapat dihitung dengan Persamaan 2.16 dan Persamaan 2.17 yaitu sebagai berikut.

$$E_{t50} = (1000 + 1,5 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 1,5 \cdot 0,651 \cdot 3000) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{1}}$$

$$= 456,0 \text{ volt}$$

$$E_{t70} = (1000 + 1,5 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 1,5 \cdot 0,651 \cdot 3000) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{1}}$$

$$= 617,3 \text{ volt}$$

Tegangan langkah yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg dan 70 kg dapat dihitung dengan Persamaan 2.30 dan Persamaan 2.31 yaitu sebagai berikut.

$$E_{s50} = (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 6 \cdot 0,651 \cdot 3000) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{1}}$$

$$= 1476,4 \text{ volt}$$

$$\begin{aligned}
 E_{s70} &= (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_f}} \\
 &= (1000 + 6 \cdot 0,651 \cdot 3000) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{1}} \\
 &= 1998,2 \text{ volt}
 \end{aligned}$$

Untuk hasil perubahan faktor reduksi, tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg dan 70 kg terhadap penambahan ketebalan lapisan batu koral secara lengkap ditunjukkan pada Tabel 4.5

Tabel 4.5 Tegangan sentuh dan langkah yang diijinkan pada seseorang dengan berat 50 dan 70 kg untuk masing-masing ketebalan batu koral

No.	Ketebalan batu koral (<i>hs</i>)	Faktor reduksi (<i>C_s</i>)	E_{t50} (volt)	E_{t70} (volt)	E_{s50} (volt)	E_{t70} (volt)
1.	0,08 meter	0,651	456,0	617,3	1476,4	1998,2
2.	0,09 meter	0,677	469,6	635,5	1530,3	2071,1
3.	0,10 meter	0,700	481,2	651,3	1576,7	2134,0
4.	0,11 meter	0,719	491,3	664,9	1617,2	2188,8
5.	0,12 meter	0,736	500,2	677,0	1652,8	2236,9
6.	0,13 meter	0,751	508,1	687,6	1684,3	2279,6
7.	0,14 meter	0,765	515,1	697,1	1712,4	2317,6
8.	0,15 meter	0,777	521,4	705,7	1737,6	2351,7

Dari hasil Tabel 4.5 menunjukkan semakin besar ketebalan batu koral, batas nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg dan 70 kg juga semakin meningkat. Sehingga semakin besar ketebalan batu koral yang digunakan maka desain sistem pengetanahan peralatan akan semakin baik.

Berdasarkan evaluasi tegangan sentuh dan tegangan langkah pada sistem pengetanahan peralatan yang sudah terpasang terhadap arus gangguan akibat penambahan unit Pembangkit baru, diperoleh tegangan sentuh sebesar 187,8 volt dan tegangan langkahnya sebesar 27,2 volt. Mengacu dari teori yang ada yaitu persamaan 2.13 dan persamaan 2.32, bahwa nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah akan turun apabila ada penambahan panjang konduktor pengetanahan. Maka dari itu nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah pada keseluruhan sistem pengetanahan peralatan akan turun setelah adanya penambahan sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit

baru. Sehingga ketebalan batu koral yang dipilih untuk sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru yaitu sebesar 0,08 meter dengan tegangan sentuh yang diijinkan untuk dengan berat badan 50 kg sebesar 456,0 volt dan tegangan langkah yang diijinkan untuk dengan berat badan 50 kg sebesar 1476,4 volt. Nilai tersebut sudah jauh di atas dari nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah sebelum adanya penambahan sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru.

Tabel 4.6 Data detail lengkap hasil perencanaan sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru

No.	Data Desain	Keterangan
1.	Luas daerah yang dilingkupi sistem pengetanahan (A)	24618,5 meter ²
2.	Total panjang konduktor horisontal/grid (L_C)	1051,2 meter
3.	Tahanan jenis permukaan material / lapisan batu koral (ρ_s)	3000 Ω -meter
4.	Ketebalan permukaan material (h_s)	0,08 meter
5.	Kedalaman penanaman konduktor grid (h)	1 meter
6.	Jenis Konduktor pengetanahan	Tembaga berlilit <i>hard-drawn</i>
7.	Diameter konduktor (d)	0,0077 meter

4.5.4 Evaluasi Perubahan Tegangan Sentuh, Tegangan Langkah, dan Tahanan Pengetanahan Setelah Adanya Penambahan Sistem Pengetanahan Peralatan untuk Unit Pembangkit Baru

Evaluasi ini untuk mengetahui berapa besarnya perubahan tegangan sentuh (E_t) dan langkah (E_s) terbesar setelah adanya penambahan sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru. Perhitungan setelah adanya penambahan sistem pengetanahan baru sama seperti saat kondisi sistem pengetanahan baru sebelum dikoneksikan yaitu menggunakan arus ke tanah terbesar pada titik B500 yaitu sebesar 8458,425 A. Data yang berubah adalah panjang total konduktor grid keseluruhan (L_C) menjadi 10871,2 meter sehingga panjang total konduktor pengetanahan keseluruhan (L_T) menjadi 11567,2 meter. Luas area yang dilingkupi sistem pengetanahan (A) menjadi 177418,5 meter². Diameter konduktor pengetanahan yang dipakai dalam evaluasi ini adalah diameter konduktor dari sistem pengetanahan yang sudah terpasang

yaitu sebesar 0,018 meter. Alasan pemilihan ini dikarenakan adanya perbedaan diameter konduktor pengetanahan yang sudah terpasang dengan konduktor pengetanahan yang baru, sehingga diameter konduktor yang dipakai dalam evaluasi ini adalah diameter konduktor pengetanahan yang jumlahnya paling banyak dipakai pada sistem pengetanahan peralatan di PT. Indonesia Power Grati.

Sistem pengetanahan yang terdapat pada PT. Indonesia Power Grati memiliki bentuk tidak beraturan. Nilai n_a , n_b , n_c , dan n_d dapat dihitung dengan Persamaan 2.25 sampai Persamaan 2.28 berdasarkan yaitu sebagai berikut.

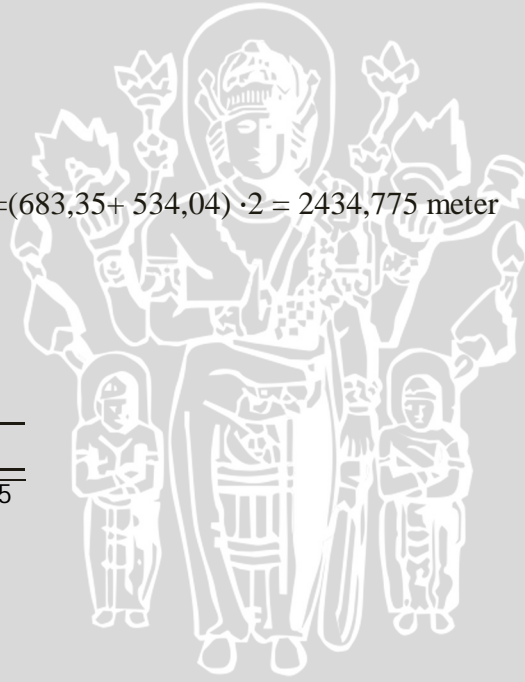
$$\begin{aligned} n_a &= \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 10871,2}{2434,775} \\ &= 8,93 \end{aligned}$$

Dengan

$$L_p = (L_x + L_y) \cdot 2 = (683,35 + 534,04) \cdot 2 = 2434,775 \text{ meter}$$

$$\begin{aligned} n_b &= \sqrt{\frac{L_p}{2 \cdot \sqrt{A}}} \\ &= \sqrt{\frac{2434,775}{2 \cdot \sqrt{177418,5}}} \\ &= 1,20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_c &= \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0,7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} \\ &= \left[\frac{683,35 \cdot 534,0375}{177418,5} \right]^{\frac{0,7 \cdot 177418,5}{683,35 \cdot 534,0375}} \\ &= 1,29 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 n_d &= \frac{D_{maks}}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \\
 &= \frac{135,5}{\sqrt{683,35^2 + 534,0375^2}} \\
 &= 0,16
 \end{aligned}$$

Jadi jumlah konduktor paralel efektif (n) dapat dihitung dengan Persamaan 2.24 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 n &= n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \\
 &= 8,93 \cdot 1,20 \cdot 1,29 \cdot 0,16 \\
 &= 2,14
 \end{aligned}$$

Faktor geometri (K_m) dihitung dengan Persamaan 2.20 yaitu sebagai berikut.

$$K_{ii} = 1$$

$$\begin{aligned}
 K_h &= \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \\
 &= \sqrt{1 + \frac{1}{1}} \\
 &= 1,414
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_m &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{(D_{maks})^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{((D_{maks} + 2 \cdot h)^2)}{8 \cdot D_{maks} \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{135,5^2}{16 \cdot 1 \cdot 0,018} + \frac{(135,5 + 2,1)^2}{8 \cdot 135,5 \cdot 0,018} - \frac{1}{4 \cdot 0,018} \right] + \frac{1}{1,414} \cdot \\
 &\quad \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot 2,14 - 1)} \right] \\
 &= 1,73
 \end{aligned}$$

Faktor ketidakmerataan kerapatan arus (K_i) dapat dihitung dengan Persamaan 2.23 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 K_i &= 0,644 + 0,148 \cdot n \\
 &= 0,644 + 0,148 \cdot 2,14 \\
 &= 0,96
 \end{aligned}$$

Penanaman konduktor efektif (L_M) dapat dihitung dengan Persamaan 2.29 yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} L_M &= L_C + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \\ &= 10871,2 + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{6}{\sqrt{683,35^2 + 534,0375^2}} \right) \right] \cdot 696 \\ &= 11955,9 \text{ meter} \end{aligned}$$

Dengan tahanan jenis tanah (ρ) untuk penanaman konduktor 7 meter sebesar 147,4 Ω -m dan arus gangguan terbesar (I_F) sebesar 8458,425 A, sehingga tegangan sentuh (E_t) yang terjadi dapat dihitung dengan Persamaan 2.19 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_F}{L_M} \\ &= \frac{147,4 \cdot 1,73 \cdot 0,96 \cdot 8458,425}{11955,9} \\ &= 173,6 \text{ volt} \end{aligned}$$

Faktor geometri K_s dapat dihitung dengan Persamaan 2.35 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} K_s &= \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D_{min} + h} + \frac{1}{D_{min}} (1 - 0,5^{n-2}) \right) \\ &= \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \cdot 1} + \frac{1}{12,7 + 1} + \frac{1}{12,7} \cdot (1 - 0,5^{2,14-2}) \right) \\ &= 0,19 \end{aligned}$$

Penanaman konduktor efektif (L_s) dapat dihitung dengan Persamaan 2.33 yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} L_s &= 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \\ &= 0,75 \cdot 10871,2 + 0,85 \cdot 696 \\ &= 8745 \text{ meter} \end{aligned}$$

Tegangan langkah (E_s) yang terjadi dapat dihitung dengan Persamaan 2.32 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_F}{L_s} \\ &= \frac{147,4 \cdot 0,19 \cdot 0,96 \cdot 8458,425}{8745} \\ &= 25,4 \text{ volt} \end{aligned}$$

Perbandingan tegangan sentuh dan tegangan langkah sebelum dan sesudah adanya penambahan sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru ditunjukkan pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Tegangan sentuh dan langkah antara sebelum dan sesudah adanya penambahan sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru

No.	Kondisi Sistem Pengetanahan	Tegangan Sentuh (volt)	Tegangan Langkah (volt)
1.	Sebelum adanya penambahan sistem pengetanahan baru	187,8	27,2
2.	Sesudah adanya penambahan sistem pengetanahan baru	173,6	25,4

Terlihat pada Tabel 4.7 adanya penurunan nilai tegangan sentuh setelah adanya penambahan sistem pengetanahan peralatan untuk unit Pembangkit baru yaitu sebesar 14,2 volt. Sedangkan nilai tegangan langkahnya turun sebesar 1,8 volt.

Seperti yang telah dijelaskan diatas, dengan adanya penambahan sistem pengetanahan baru menyebabkan bertambahnya panjang konduktor keseluruhan dan luas area yang dilingkupi sistem pengetanahan peralatan juga bertambah. Bertambahnya panjang konduktor pengetanahan dan luas area yang dilingkupi sistem pengetanahan akan merubah tahanan pengetanahan antara sebelum dan sesudah adanya sistem pengetanahan baru.

Dengan tahanan jenis tanah (ρ) sebesar 147,4 Ω -m, panjang total konduktor pengetanahan keseluruhan (L_T) sebesar 10516 meter, kedalaman penanaman konduktor grid (h) sebesar 1 meter dan luas area yang dilingkupi sistem pengetanahan (A) sebesar

152800 m² tahanan pengetanahan (R_{g1}) sebelum adanya sistem pengetanahan baru dihitung dengan menggunakan persamaan 2.13.

$$\begin{aligned} R_{g1} &= \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \\ &= 147,4 \cdot \left[\frac{1}{10516} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 152800}} \left(1 + \frac{1}{1+1\sqrt{\frac{20}{152800}}} \right) \right] \\ &= 0,182 \Omega \end{aligned}$$

Setelah adanya sistem pengetanahan baru panjang total konduktor pengetanahan keseluruhan (L_T) menjadi 11567,2 meter dan luas area yang dilingkupi sistem pengetanahan (A) sebesar 177418,5 meter². Tahanan jenis tanah (ρ) diambil pada sistem pengetanahan yang sudah terpasang yaitu sebesar 147,4 Ω -m tahanan pengetanahan (R_{g2}) setelah adanya penambahan sistem pengetanahan baru dihitung dengan menggunakan persamaan 2.13.

$$\begin{aligned} R_{g2} &= \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \\ &= 147,4 \cdot \left[\frac{1}{11567,2} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 177418,5}} \left(1 + \frac{1}{1+1\sqrt{\frac{20}{177418,5}}} \right) \right] \\ &= 0,168 \Omega \end{aligned}$$

Dari perhitungan tahanan pengetanahan diatas, setelah adanya penambahan sistem pengetanahan baru tahanan pengetanahannya berkurang sebesar 0,014 Ω .