

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

Data yang digunakan adalah data yang telah didapat dari Gardu Induk 150 KV Semanu melalui wawancara dengan *supervisor* dan merujuk pada penelitian-penelitian terkait. Selanjutnya data tersebut akan digunakan sebagai bahan perhitungan dan akan dibandingkan menggunakan standar IEEE std. 80 *Guide for Safety in AC Substation*.

4.1.2 Data Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 KV Semanu

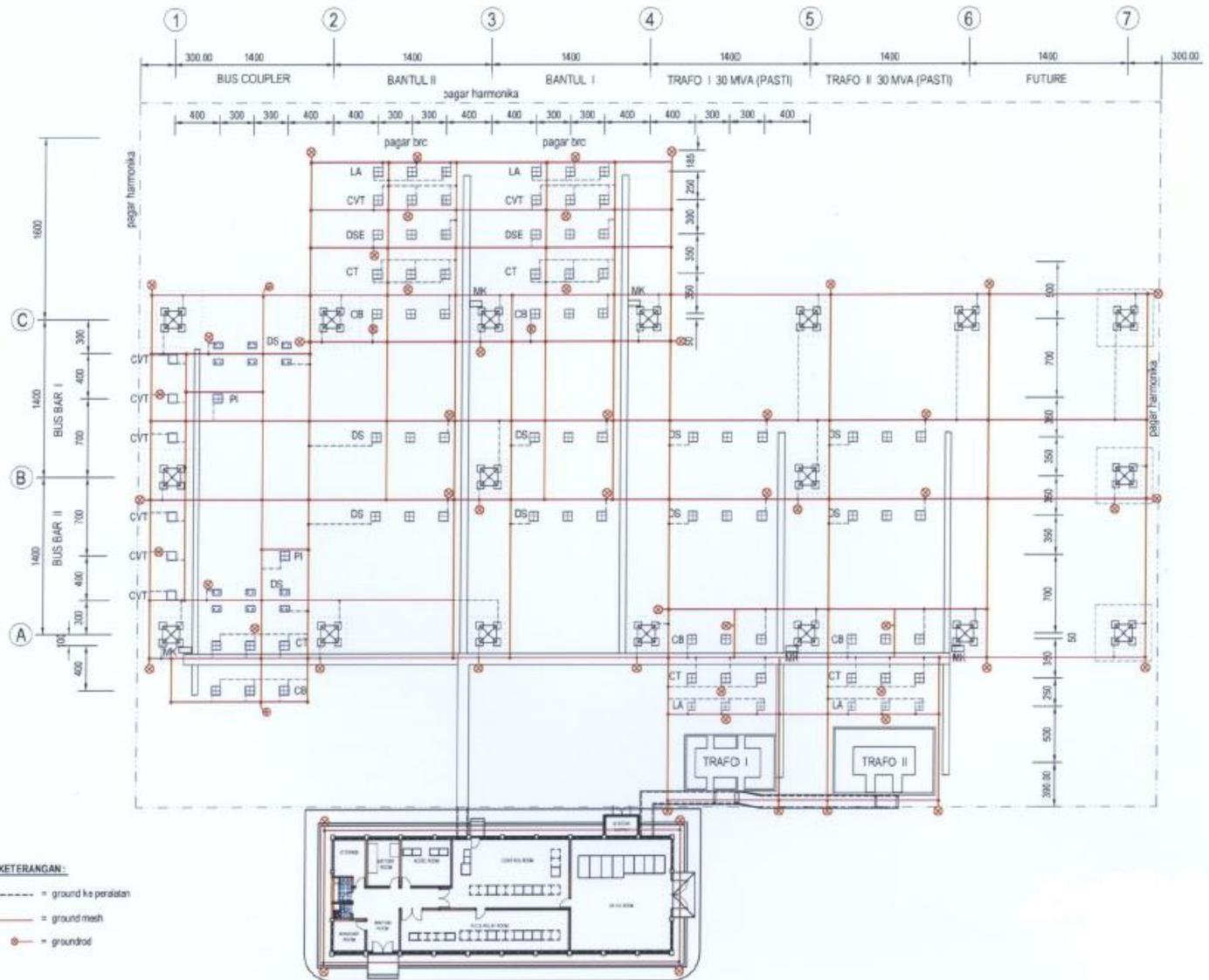
Sebelum melakukan analisis maka diperlukan beberapa data yang dapat digunakan sebagai bahan perhitungan. Berikut merupakan data-data yang di dapat dari sistem pentanahan yang ada di Gardu Induk 150 kv Semanu.

Tabel 4.1 Data Sistem Petanahan

No	Data	Nilai
1	Luas Sistem Pentanahan	5130 m ² (90m × 57m)
2	Hambatan Tanah	0,75 Ω
3	Diameter Batang Pentanahan	20 mm
4	Panjang Bantang Pentanahan	6 m
5	Jumlah Batang Pentanahan	55 buah
6	Total Panjang Batang Pentanahan	330 m
7	Diameter Konduktor <i>Grid</i>	18 mm
8	Total Panjang Konduktor <i>Grid</i>	1062 m
9	Kedalaman Konduktor <i>Grid</i>	30 cm
10	Arus Gangguan yang Pernah Terjadi	1954 A
11	Jarak antar Elektroda	7 m
12	Jari-jari dari luas gardu induk	53,26 m

4.1.3 Tata Letak Sistem Pentanahan Gardu Induk 150 KV Semanu

Tata letak sistem pentanahan serta titik-titik batang pentanahan di Gardu Induk 150 kv Semanu dapat dilihat pada gambar 4.1 di bawah.



Gambar 4.1 *Layout* Sistem Pentanahan

4.1.4 Data *Setting* Waktu OCR dan GFR

Data setting waktu *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) digunakan untuk mengetahui lama waktu gangguan yang terjadi yang memungkinkan berdampak kepada manusia yang ada di daerah *switchyard*. Pada Gardu Induk 150 KV Semanu menggunakan OCR dan GFR dengan tipe

MICOM P122 dengan *setting* waktu sebesar 0.33 detik. *Setting* waktu OCR dan GFR sama karena pada Gardu Induk 150 KV Semanu kedua relay tersebut menjadi 1 perangkat. Sedangkan waktu bekerja PMT untuk benar-benar terputus dengan sistem adalah 0.39 detik. Sehingga waktu pemutusan listrik yang diperlukan ketika terjadi gangguan adalah jumlah antara waktu kerja relay dan waktu kerja PMT. Sehingga lama waktu gangguan maksimum adalah jumlah antara waktu kerja OCR dengan PMT yaitu 0,72 detik.

4.2 Perhitungan dan Analisis

Setelah mendapatkan data-data yang diperlukan di Gardu Induk 150 KV Semanu maka dilanjutkan dengan perhitungan yang mengacu pada standar IEEE Std.80 *Guide for Safety in AC Substation*.

4.2.1 Hambatan Jenis Tanah

Berdasarkan data yang didapat dari Gardu Induk 150 kv Semanu hambatan tanah di lokasi tersebut adalah $0,75\Omega$. Hambatan tanah terukur pada Gardu Induk 150 kv Semanu sangatlah bagus karena menurut PUIL nilai hambatan tanah yang baik adalah $<1\Omega$. Selanjutnya untuk mengetahui hambatan jenis tanahnya dapat dihitung dengan persamaan (3.2) dengan jarak antar elektroda (a) sebesar 7 meter.

$$\rho = 2\pi aR$$

$$\rho = 2 \times 3,14 \times 7 \times 0,75$$

$$\rho = 32,97 \Omega.m$$

Menurut perhitungan di atas hambatan jenis tanah pada Gardu Induk 150 kv Semanu adalah $32,97 \Omega.m$.

4.2.2 Arus Fibrilasi

Arus fibrilasi merupakan batas arus yang dapat menyebabkan jantung vertikel manusia berhenti sehingga dapat menyebabkan manusia mati secara seketika. Arus fibrilasi dapat dicari menggunakan persamaan (3.3) dengan

catatan nilai konstanta untuk manusia dengan berat badan 50 kg dan 70 kg berbeda dengan lama waktu gangguan (t) sebesar 0,72 detik.

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t}}$$

K untuk 50 kg = 0,166

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{0,72}}$$

$$I_B = 0,137 \text{ A}$$

K untuk 70 kg = 0,157

$$I_B = \frac{0,157}{\sqrt{0,72}}$$

$$I_B = 0,185 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan di atas arus fibrilasi yang diperbolehkan untuk manusia dengan berat badan 50 Kg adalah 0,137 ampere sedangkan manusia dengan rata-rata berat 70 Kg adalah 0,185 ampere.

4.2.3 Tegangan Setuh dan Tegangan Langkah yang Diizinkan

Pada Gardu Induk 150 kv Semanu lapisan atas tanah diberi kerikil koral. Kerikil koral ini berpengaruh terhadap batas maksimum dari tegangan langkah dan tegangan sentuh yang diizinkan. Berdasarkan PUIL 2011 yang juga dapat dilihat pada tabel 2.1 hambatan jenis tanah berpasir dan berkerikil adalah 1000 Ω .m sehingga untuk perhitungan selanjutnya nilai hambatan kerikil koral adalah 1000 Ω .m

Karena terdapat 2 jenis tanah yang berbeda maka perlu diketahui terlebih dahulu nilai faktor koreksi permukaan tanah antara kedua jenis tanah tersebut. Untuk mencari nilai C_s dapat menggunakan persamaan di bawah.

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

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{32,97}{1000}\right)}{2 \times 0,1 + 0,09}$$

$$C_s = 0,70$$

Dari perhitungan di atas faktor koreksi permukaan tanah di Gardu Induk 150 kv Semanu adalah 0,70. Selanjutnya faktor koreksi ini akan digunakan pada perhitungan batas tegangan langkah dan batas tegangan sentuh.

4.2.4 Batas Tegangan Langkah

Batas tegangan langkah merupakan batas nilai tegangan yang dapat diterima ketika seseorang berdiri di atas sistem pentanahan yang sedang terjadi gangguan. Adapun nilai tegangan langkah dibagi berdasarkan berat badan manusia yaitu manusia dengan berat badan 50 kg dan 70 kg. Nilai tegangan langkah bisa dicari dengan menggunakan persamaan (3.4). Berikut merupakan perhitungan nilai tegangan langkah untuk 50 kg dan 70 kg:

Untuk manusia dengan berat badan 50 kg:

$$E_{langkah} = (R_B + 2R_f)I_B$$

$$E_{langkah} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) I_B$$

$$E_{langkah} = (1000 + 6 \times 0,7 \times 1000) 0,137$$

$$E_{langkah} = 712,4 \text{ volt}$$

Untuk manusia dengan berat badan 70 kg:

$$E_{langkah} = (R_B + 2R_f)I_B$$

$$E_{langkah} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) I_B$$

$$E_{langkah} = (1000 + 6 \times 0,7 \times 1000) 0,185$$

$$E_{langkah} = 962 \text{ volt}$$

Batas tegangan langkah yang diizinkan pada area Gardu Induk 150 kv Semanu adalah 712,4 volt untuk manusia dengan berat badan 50 kg dan 962 volt untuk manusia dengan berat badan 70 kg.

4.2.5 Batas Tegangan Sentuh

Batas tegangan sentuh merupakan tegangan maksimum yang dapat diterima oleh manusia dengan berat badan tertentu ketika manusia tersebut menyentuh komponen di saat sedang terjadi gangguan. Untuk mengetahui nilai batas tegangan sentuh dapat dihitung menggunakan persamaan. Berikut merupakan batas tegangan sentuh untuk berat badan 50 kg dan 70 kg:

Untuk manusia dengan berat badan 50 kg:

$$E_{sentuh} = \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) I_B$$

$$E_{sentuh} = (1000 + 1,5C_s \times \rho_s) I_B$$

$$E_{sentuh} = (1000 + 1,5 \times 0,7 \times 1000) 0,137$$

$$E_{sentuh} = 280,85 \text{ volt}$$

Untuk manusia dengan berat badan 70 kg:

$$E_{sentuh} = \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) I_B$$

$$E_{sentuh} = (1000 + 1,5C_s \times \rho_s) I_B$$

$$E_{sentuh} = (1000 + 1,5 \times 0,7 \times 1000) 0,185$$

$$E_{sentuh} = 379,25 \text{ volt}$$

Dari perhitungan di atas maka dapat diketahui batas tegangan sentuh yang aman bagi manusia dengan berat badan 50 kg adalah 280,85 volt sedangkan untuk manusia dengan berat badan 70 kg adalah 379,25 volt.

4.2.6 Tegangan Langkah yang Sebenarnya

Tegangan langkah sebenarnya adalah besarnya tegangan gangguan yang terjadi yang dapat dirasakan manusia ketika berdiri di atas sistem pentanahan tersebut. Untuk mencari nilai tegangan langkah sebenarnya dapat menggunakan persamaan (3.6). Sebelum mencari nilai tegangan langkah sebenarnya perlu diketahui terlebih dahulu nilai dari K_s dan K_i . Pada sistem pentanahan yang ada di Gardu Induk Semanu diketahui bahwa nilai fakto geometrik (n) adalah 7,47.

$$L_s = 0,75 \times L_C + 0,85 \times L_R$$

$$L_s = 0,75 \times 1062 + 0,85 \times 330$$

$$L_s = 1077$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times n$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times 7,47$$

$$K_i = 1,75$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0,3} + \frac{1}{5 + 0,3} + \frac{1}{5} (1 - 0,5^{7,47-2}) \right]$$

$$K_s = 0,65$$

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_G}{L_s}$$

$$E_s = \frac{32,97 \times 0,65 \times 1,75 \times 1954}{1077}$$

$$E_s = 68,04 \text{ volt}$$

Dari perhitungan di atas didapat nilai tegangan langkah sebenarnya di Gardu Induk 150 kv Semanu adalah 68,04 volt.

4.2.7 Tegangan Mesh / Sentuh Sebenarnya

Tegangan *mesh* merupakan besarnya nilai tegangan yang diterima oleh tubuh manusia ketika menyentuh komponen yang diketanahkan saat gangguan terjadi. Nilai K_i pada tegangan *mesh* sama dengan nilai k_i pada tegangan langkah sebenarnya.

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R$$

$$L_M = 1062 + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{6}{\sqrt{90^2 + 57^2}} \right) \right] 330$$

$$L_M = 1086,22$$

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

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0,3}{1}}$$

$$K_h = 1,14$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} + \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{5^2}{16 \cdot 0,3 \cdot 0,18} + \frac{(5 + 2 \cdot 0,3)^2}{8 \cdot 5 \cdot 0,18} + \frac{0,3}{4 \cdot 0,18} \right] + \frac{1}{1,14} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot 7,53 - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0,319$$

Setelah nilai k_m , k_i , L_m telah di dapat maka dilanjutkan dengan menghitung tegangan sentuh sebenarnya dengan menggunakan persamaan (3.10)

$$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_G}{L_M}$$

$$E_m = \frac{32,97 \times 0,319 \times 1,75 \times 1954}{1086,22}$$

$$E_m = 33,1 \text{ volt}$$

Berdasarkan perhitungan di atas nilai tegangan *mesh/* sentuh sebenarnya yang ada di Gardu Induk 150 kv Semanu adalah sebesar 33,1 volt.

4.2.8 Evaluasi Keamanan Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh

Evaluasi keamanan tegangan langkah dan tegangan sentuh dilakukan dengan membandingkan batas tegangan langkah dengan tegangan langkah sebenarnya dan batas tegangan sentuh dengan tegangan *mesh/* sentuh sebenarnya. Dimana tegangan langkah sebenarnya haruslah lebih kecil dibandingkan dengan batas tegangan langkah ($E_s < E_{langkah}$) dan tegangan *mesh* atau tegangan sentuh sebenarnya harus lebih kecil dari batas tegangan

sentuh ($E_m < E_{sentuh}$). Perbandingan tersebut berlaku baik untuk manusia dengan berat badang 50 kg maupun 70 kg.

4.2.9 Perbandingan Batas Tegangan Langkah dengan Tegangan Langkah Sebenarnya

Untuk mengetahui keamanan sistem pentanahan pada Gardu Induk 150 kv Semanu kita perlu membandingkan batas tegangan langkah dengan tegangan langkah sebenarnya nilai dari masing-masing tegangan dapat dilihat pada tabel 4.2 di bawah.

Tabel 4.2 Perbandingan tegangan langkah

Berat badan	Batas tegangan langkah (v)	Tegangan langkah sebenarnya (v)
50 kg	712,4	68,04
70 kg	962	

Berdasarkan tabel 4.2 di atas diperoleh batas tegangan langkah untuk manusia dengan berat badan 50 kg adalah 712,4 volt, sedangkan batas tegangan langkah untuk manusia dengan berat badan 70 kg adalah sebesar 962 volt. Jika dibandingkan antara tegangan langkah sebenarnya dengan kedua batas tegangan untuk manusia dengan berat 50 kg dan 70 kg, nilai tegangan langkah sebenarnya dari sistem pentanahan tersebut lebih kecil dari batas tegangan langkahnya. Sehingga berdasarkan perbandingan di atas maka dapat disimpulkan bahwa sistem pentanahan tersebut aman terhadap tegangan langkah yang mungkin terjadi.

4.2.10 Perbandingan Batas Tegangan Sentuh dengan Tegangan Sentuh Sebenarnya

Selanjutnya dilakukan perbandingan tegangan sentuh dan tegangan sentuh sebenarnya untuk mengetahui apakah nilai tegangan sentuh sebenarnya lebih kecil dari batas tegangan sentuh yang diizinkan.

Tabel 4.3 Perbandingan tegangan sentuh

Berat badan	Batas tegangan sentuh (v)	Tegangan sentuh sebenarnya (v)
50 kg	280,85	33,1
70 kg	379,25	

Dapat dilihat pada tabel 4.3 di atas tegangan sentuh sebenarnya lebih kecil dibandingkan dengan batas tegangan sentuh untuk manusia dengan berat badan 50 kg dan 70 kg. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem pentanahan yang sudah ada di Gardu Induk 150 kv Semanu aman terhadap tegangan sentuh.

4.2.11 Batas maksimum Arus yang Dapat Diamankan

Arus maksimum yang dapat terjadi pada sistem transmisi tidak dapat dicari dikarenakan oleh kurangnya data yang di dapat dari Gardu Induk 150 kv Semanu. Sehingga diambil inisiatif untuk mencari seberapa besar arus gangguan yang dapat diamankan oleh sistem pentanahan yang ada di Gardu Induk 150 kv Semanu.

Setelah menemukan batas tegangan sentuh dan tegangan langkah maka dapat diketahui juga arus gangguan maksimum yang masih bisa diamankan dengan sistem pentanahan yang sudah ada di Gardu Induk 150 kv Semanu dengan menggunakan persamaan (3.10) dengan cara mengganti nilai tegangan *mesh/* sentuh sebenarnya dengan batas tegangan sentuh yang telah ada. Kita ambil contoh dengan menggunakan tegangan sentuh dengan berat badan 70 kg. Sehingga secara sistematis dapat ditulis seperti persamaan di bawah.

$$\frac{E_{Sentuh} \times L_M}{\rho \times K_m \times K_i} = I_G$$

$$\frac{379,25 \times 1086,22}{32,97 \times 0,319 \times 1,75} = I_G$$

$$I_G = 16574,66 A$$

Dengan melakukan metode yang sama seperti perhitungan di atas maka didapatkan hasil perbandingan arus gangguan maksimum seperti tabel 4.4 di bawah.

Tabel 4.4 Perbandingan Arus Gangguan Maksimum

IG maksimum sentuh 70kg	22381,84 A
IG maksimum sentuh 50kg	16574,66 A
IG maksimum langkah 70kg	27862,66 A
IG maksimum langkah 50kg	20633,43 A

Dengan demikian batas arus maksimum yang dapat diamankan oleh sistem pentanahan pada Gardu Induk 150 kv Semanu adalah arus yang paling kecil dari tabel 4.4 sehingga manusia dengan berat badan 50 kg dan 70 kg aman terhadap tegangan langkah maupun tegangan sentuh yang mungkin terjadi. Nilai terkecil pada tabel 4.4 di atas yaitu 16574,66 A, yang berarti jika arus ganggan yang terjadi melebihi 16574,66 A maka dapat membahayakan manusia di area Gardu Induk 150 kv Semanu.

4.2.12 Tegangan Pindah

Tegangan pindah adalah suatu kasus khusus dimana seseorang menyentuh konduktor yang sedang dialiri arus gangguan namun diketanahkan pada jarak yang jauh. Untuk mengetahui nilai dari tegangan pindah dapat dicari menggunakan persamaan (2.15), namun sebelum mencari nilai tegangan pindah kita perlu mengetahui besar tahanan ekuivalen (R_0) dengan menggunakan persamaan (2.16).

$$R_0 = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

$$R_0 = \frac{32,97}{4 \times 53,26} + \frac{32,97}{1392}$$

$$R_0 = 0,178 \Omega$$

Sehingga : $E_{pindah} = I \times R_0$

$$E_{pindah} = 1954 \times 0,178$$

$$E_{pindah} = 347,81 \text{ volt}$$

Jadi nilai tegangan pindah yang mungkin terjadi adalah sebesar 347,81 volt. Untuk waktu lama gangguan tegangan pindah yang diizinkan sama dengan waktu tegangan sentuh seperti tabel 2.5. Sehingga dengan tegangan pindah sebesar 347,81 volt waktu yang diizinkan untuk tegangan pindah adalah lebih dari 3 detik.