

BAB IV

HASIL PENELITIAN dan PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

Data Penelitian merupakan data yang menjadi masukan input rumus yang digunakan untuk menemukan hasil perhitungan. Hasil perhitungan dibandingkan dengan Standarisasi IEEE Std.80 *Guide for Safety in AC Substation Grounding* untuk selanjutnya dianalisis. Berikut adalah beberapa data yang digunakan dalam penelitian:

4.1.1 Data Teknisi/Operator

Pada Gardu Induk 150 kV Bantul terdapat beberapa teknisi/operator yang bekerja, dengan nama dan data berat badan. Informasi tampak ada pada tabel 4.1 dibawah.

Tabel 4.1 Tabel Data Teknisi/Operator

Nomor	Nama	Berat Badan (kg)
1	Widi Aliyanto	65
2	Nur Hidayatulah	62
3	Willy	55

Data berat badan tersebut diatas digunakan untuk menentukan nilai arus fibrasi. Klasifikasi berat badan dijadikan acuan penilaian standar yang telah diatur sesuai berat badan pada IEEE 80 *Guide For Safety in AC Substation Grounding*.

4.1.2 Setting Waktu Gangguan

Pada Sistem Gardu Induk 150 Kv Bantul terdapat relay yang bekerja saat ada gangguan berlebih pada sistem ke tanah yaitu *Ground Fault Relay* (GFR) dan *Over Current Relay* (OCR) dimana bekerja bedasarkan waktu. Berikut tabel 4.2 *setting* waktu pada relay GFR dan OC

Tabel 4.2 Tabel Setting Waktu GFR dan OCR

Jenis	Type	Tms (detik)
OCR	Sifang 211	0,39
GFR	GFR	0,63

Nilai setting waktu kerja relay berbeda karena perbedaan fungsi. dimana OCR digunakan pada saat terjadi arus lebih pada rangkaian sedangkan, GFR digunakan pada saat terjadi arus gangguan yang mengalir ketanah.

4.1.3 Data Sistem Mesh Pentanahan Gardu Induk 150 kV Bantul

Data sistem mesh pentanahan gardu induk 150 KV Bantul ialah data yang didapatkan pada Gardu Induk 150 KV Bantul dan Kantor Unit Induk Pembangunan PLN Bagian Tengah II, dimana data yang didapat berdasarkan dari wawancara yang disesuaikan dengan keperluan data penelitian yang tidak semua data bisa diberikan karena sifat kerahasiaan informasi perusahaan PT. PLN (Persero). Tabel 4.3 dibawah menunjukkan sistem pentanahan yang ada pada Gardu Induk 150 KV Bantul.

Tabel 4.3 Data Sistem Pentanahan Gardu Induk Bantul

Nomor	Data Desain	Keterangan
1	Switchyard (Luas Tanah yang dilindungi sistem pentanahan)	6.472 m ² (154,1 m x 42 m)
2	Panjang konduktor rod	5 meter
3	Panjang Keseluruhan rod	1.165 meter
4	Sifat Permukaan Tanah	1,75 x 10 ⁶ watt/s m ³ °C
5	Tahanan Jenis Tanah (Tanah Rawa)	39 Ω
6	Diameter Konduktor Rod	40mm
7	Diameter Konduktor kisi-kisi	20mm

Tabel 4.3 Data Sistem Pentanahan Gardu Induk Bantul Lanjutan

Nomor	Data Desain	Keterangan
8	Kedalaman Penanaman Konduktor kisi-kisi	2 meter
9	Jarak antara konduktor kisi-kisi	2 meter

4.1.4 Bay dan Jumlah Titik Rod Pada Gardu Induk 150 KV Bantul

Gardu Induk 150 KV Bantul memiliki 14 Bay dimana setiap bay memiliki titik pentanahan masing-masing disesuaikan dengan peralatan yang ada, yang setiap titik memiliki konduktor rod dan setiap rod pada setiap titik pentanahan saling terhubung dengan yang lain membentuk jala-jala (mesh). Berikut tabel dari bay dan titik pentanahannya:

Tabel 4.4 Bay dan Titik Pentanahan

Nomor	Nama Bay	Jumlah titik pentanahan
1	Bay Wirobrajan 1	18 titik
2	Bay Wirobrajan 2	18 titik
3	Bay Bantul	18 titik
4	Bay Klaten 1	15 titik
5	Bay Klaten 2	18 titik
6	Bay Perworejo	18 titik
7	Bay Wates	18 titik
8	Bay Kentungan	12 titik
9	Bay Trafo 1	12 titik
10	Bay Trafo 2	18 titik
11	Bay Trafo 3	18 titik
12	Bay Semanu 1	18 titik
13	Bay Semanu 2	18 titik
14	Bay Kopel dan Busbar	15 titik
	Jumlah Ttitil Pentanahan	234 titik

Jumlah titik pentanahan yang ada pada setiap bay berbeda-beda hal tersebut terjadi karena jumlah peralatan yang digunakan juga berbeda. Sebagai contoh bay Bantul dengan bay Klaten yang setiap titik pentanahan menyesuaikan jumlah pada peralatan yang diproteksi.

4.1.5 Arus Gangguan Gardu Induk 150 KV Bantul

Arus gangguan merupakan arus yang terjadi karena kesalahan isolasi peralatan serta gangguan dari luar. Gangguan pada isolasi peralatan dapat terjadi karena phasa yang ada pada peralatan trafo, PT, PMT, dan CT. Gangguan luar disebabkan oleh hewan dan arus gangguan bisa dari jalur transmisi yang terhubung dengan gardu induk. Arus gangguan direkam menggunakan alat *Disturbance Fault Recorder* yang dapat mencatat jumlah arus gangguan yang terjadi. Tabel 4.5 memberikan informasi arus gangguan yang pernah terjadi pada gardu induk 150 kV Bantul.

Tabel 4.5 Arus Gangguan

Waktu Gangguan	Jenis Gangguan	Besar Arus Gangguan (Ampere)
Agustus 2016	Dist.prot start , Carier recive , Distance trip zone 1 , carier sending , reclose block	90 Ampere
November 2016	1. AR in progress, Press fail step 1, CB trip, AR block, Lock out relay, Pump, Distance reclose relay, lock out relay	267 Ampere
Agustus 2018	Distance Protection Trip, AR progres, carier receive, CB trip lock out rele operated.	218 Ampere
Januari 2018	Dist Prot Star, Dist Trip Zone 1, Carrier Sending, Reclose Succes/ Trip A, Zone 1, FL:28.10 km	Tidak Tecatat
Januari 2018	Dist Prot Start,Trip Zone 1,Carir Sending,Reclose	Tidak Tercatat
April 2018	Kegagalan Peralatan Trafo 150 kV	16909 Ampere

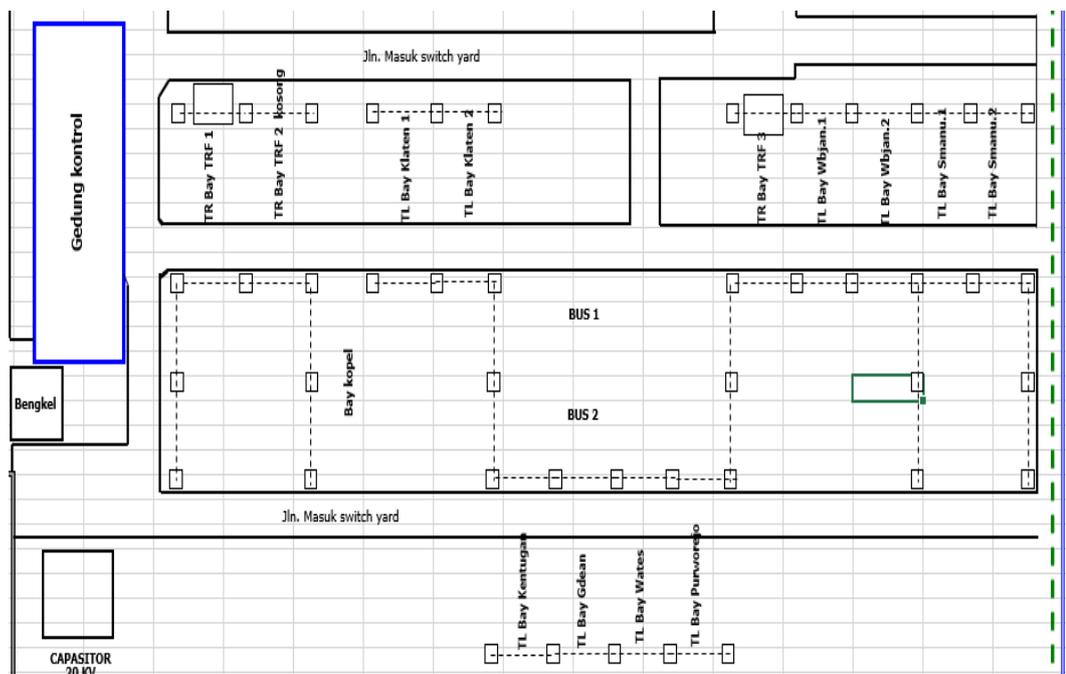
Data gangguan yang terjadi selalu disimpan sebagai evaluasi kedepannya agar mengurangi resiko gangguan serupa. Arus gangguan dibulan april 2018 dijadikan nilai yang digunakan dalam perhitungan yang ada, karena gangguan yang terjadi pada bulan april merupakan gangguan yang sangat besar yang tercatat yaitu 16909 Ampere karena ada kesalahan yang terjadi pada trafo.

4.2 Perhitungan Dan Analisis

Pada sub bab ini akan dilakukan perhitungan dan analisis data sesuai dengan data penelitian yang didapatkan selama penelitian. Peneliti telah mendapatkan data dari 2 tempat yaitu Gardu Induk 150 KV Bantul dan Unit Induk Pembangunan Jawa Bagian Tengan II.

4.2.1 Tata Letak Gardu Induk 150 kV Bantul

Tata letak disesuaikan dengan keadaan sangat pembangunan dan dimana keadaan yang ada dari trafo telah ada walau dalam tahap perencanaan. Berikut merupakan layout posisi setiap bay:



Gambar 4.1 Tata Letak Bay Gardu Induk

4.2.2 Tahanan Jenis Tanah

Berikut merupakan perhitungan dari nilai tahanan jenis tanah yang ada pada gardu induk 150 kV Bantul dimana nilai dipengaruhi oleh nilai jarak antar elektroda dan tahanan terukur:

$$\rho = 2 \pi aR \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana : ρ : Tahanan Jenis Rata-rata Tanah (Ωm)

a : Jarak Antar Konduktor Kisi-kis (m)

R: Tahanan Terukur (Ω)

Diketahui: a : 2 meter

$$R: 0,46 \Omega$$

Ditanya nilai Tahanan jenis Tanah?

$$\rho = 2 \pi aR$$

$$\rho = 2 \pi 2.0,46$$

$$\rho = 5,77 \Omega m$$

Terdapat perbedaan hasil antara nilai tahanan jenis tanah pada perhitungan 5,77 Ωm dengan data pengukuran dilapangan 39 Ω . Nilai hasil perhitungan akan digunakan sebagai acuan pada kalkulasi berikutnya. Pada Gardu Induk 150 KV Bantul jenis tanah yang ada merupakan jenis tanah rawa sehingga nilai tahanan yang terukur sangat bagus kurang dari 1 Ω dimana memenuhi standar peraturan IEEE Std.80 tentang nilai pentanahan ialah dibawah 5 Ω

4.2.3 Jumlah Batang Pentanahan Yang Diperlukan

Untuk mengetahui jumlah batang pentanahan yang seharusnya dimiliki oleh sistem pentanahan Gardu Induk Bantul 150 KV maka terlebih dahulu mengetahui nilai kerapatan arus pada permukaan batang pentanahan. Perhitungan nilai kerapatan arus dapat dihitung dengan rumus:

$$i = 3.1414 \times 10^{-5} d \sqrt{\frac{\delta \theta}{\rho t}} \dots \dots \dots (4.2)$$

Dimana: i = kerapatan arus yang diizinkan (amp/cm)

d = diameter batang pentanahan (mm)

δ = panas spesifik rata-rata tanah ($1,75 \times 10^6$ watt/s m^3 °C)

θ = kenaikan suhu tanah yang diizinkan (°C)

ρ = tahanan jenis tanah (Ω .m)

t = lama setting waktu gangguan (detik)

Diketahui: $d = 40$ mm

$$\delta = 1,75 \times 10^6 \text{ watt/s } m^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho = 39 \text{ } \Omega$$
.m

$$t = 0,6 \text{ detik}$$

Ditanya: Nilai Kerapatan Arus?

$$i = 3.1414 \times 10^{-5} d \sqrt{\frac{\delta \theta}{\rho t}}$$

$$i = 3.1414 \times 10^{-5} 40 \sqrt{\frac{1750000 \times 50}{39 \times 0,6}}$$

$$i = 3.1414 \times 10^{-5} 40 \sqrt{\frac{87500000}{23,4}}$$

$$i = 3.1414 \times 10^{-5} 40 \sqrt{3739316}$$

$$i = 3.1414 \times 10^{-5} \cdot 40 \cdot 1933,7$$

$$i = 3.1414 \times 10^{-5} \cdot 77348$$

$$i = 2,42 \text{ Ampere/cm}$$

Nilai kerapatan arus yang mengalir pada tanah ialah 2,42 Ampere/cm. Untuk mendapatkan jumlah batang pentanahan yang harus dipenuhi, perlu memasukan nilai arus gangguan dan panjang konduktor batang pentanahan. Nilai batang pentanahan yang dibutuhkan ialah:

$$\frac{\text{arus gangguan}}{\text{panjang batang pentanahan} \times 100 \times \text{kerapatan arus yang diizinkan}}$$

$$\frac{16909}{5 \times 100 \times 2,42} = 14 \text{ Batang}$$

Pada perhitungan jumlah batang pentanahan menggunakan rumus diperoleh nilai sebanyak 14 batang pentanahan. Sementara dilapangan ialah 234 batang pentanahan. Hal tersebut bisa terjadi karena dalam perhitungan aspek yang paling dilihat resiko arus yang mengalir pada batang pentanahan ke tanah sedangkan pada kondisi dilapangan lebih diutamakan mengamankan peralatan. Peralatan yang memiliki phasa maka wajib memiliki satu titik pentanahan, karena satu bay memiliki banyak peralatan maka dibuat satu titik pentanahan pada setiap phasa peralatan. Jumlah batang pentanahan yang ada pada Gardu Induk 150 KV Bantul sudah memenuhi standar karena jumlah titik pentanahan yang ada dilapangan lebih banyak dari jumlah titik pentanahan yang dihitung menggunakan rumus.

4.2.4 Arus Fibrasi

Perhitungan kali ini akan menghitung arus fibrasi yaitu arus yang mengalir pada tubuh manusia. Berdasarkan IEEE Std.80 ada 2 klasifikasi, yaitu berat 50 kg dengan nilai $k : 0,0135$ dan berat 70 kg dengan nilai $k : 0,0246$. Berat operator yang bekerja pada Gardu Induk 150 KV Bantul yaitu 65,62 kg dan 55 kg berada pada kisaran dari dua ketentuan yang disebutkan. Berikut rumus yang digunakan:

$$Ik = \frac{k}{\sqrt{t}} \dots \dots \dots (4.3)$$

Dimana: Ik = Besarnya arus yang melakui tubuh manusia (Ampere)

$k = 0,0135$ untuk manusia dengan berat 50 kg.

$= 0,0246$ untuk manusia dengan berat 70 kg.

t = waktu gangguan (detik)

Berdasarkan data yang didapatkan pada Gardu Induk 150 KV Bantul lama gangguan yang terjadi pada bulan april ialah 71 ms = 0,071 detik dimana lama gangguan yang terjadi jauh dibawah setting relai gangguan tanah yaitu 0,63 detik jadi relai bekerja dengan sangat baik dalam mengamankan gangguan yang terjadi ketanah dan telah memenuhi standar.

4.2.4.1 Arus Fibrasi Pada berat 50 kg

Diketahui: $k_{50} = \sqrt{0,0246} = 0,157$ Ampere

$t = 0,071$ detik

Maka sesuai rumus yang ada akan dimasukan nilai sesuai rumus untuk menemukan nilai arus fibrasi pada berat 50 kg.

Ditanya: besar arus yang melalui manusia (Ik)?

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

$$Ik = \frac{0,116}{\sqrt{0,071}}$$

$$Ik = \frac{0,116}{0,26}$$

$$Ik = 0,44 \text{ ampere}$$

Jadi, nilai arus fibrasi (I_k) yang mengalir pada berat 50 kg ialah 0,44 ampere.

4.2.2.1 Arus Fibrasi Pada Berat 70 kg

$$\text{Diketahui: } k_{70} = \sqrt{0,0135} = 0,157 \text{ Ampere}$$

$$t = 0,071 \text{ detik}$$

Ditanya: besar arus yang mengalir manusia (I_k)?

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

$$Ik = \frac{0,157}{\sqrt{0,071}}$$

$$Ik = \frac{0,157}{0,26}$$

$$Ik = 0,60 \text{ ampere}$$

Jadi, nilai arus fibrasi (I_k) yang mengalir pada berat 70 kg ialah 0,60 ampere

Analisis dari nilai arus fibrasi yang didapat pada berat 50 kg sebesar 0,44 ampere dan pada berat 70 kg sebesar 0,60 ampere maka nilai ini merupakan nilai batas arus yang mengalir pada tubuh manusia dengan berat badan 50 kg dan 70 kg. Pada Tabel 2.3 Batas arus yang mempengaruhi manusia dengan besar arus 0 – 0,9 ampere tidak akan mempengaruhi tubuh manusia bila tubuh manusia mendapatkan nilai arus yang lebih besar maka akan mempengaruhi tubuh manusia dari kejang-kejang sampai kematian bila besar arus yang mengalir mencapai 100 ampere.

4.2.5 Perhitungan Batas Tegangan Sentuh

Setelah mengetahui nilai dari besar arus fibrasi pada manusia berat 50 kg dan 70 kg maka selanjutnya mengetahui nilai dari batas tegangan sentuh pada manusia dengan berat 50 kg dan 70 kg. Maka dengan mengetahui besar arus fibrasi, tahanan jenis tanah, dan tahanan tubuh manusia maka akan didapatkan nilai batas tegangan sentuh pada berat 50 kg dan 70 kg, berikut rumus yang digunakan:

$$E_s = I_k (R_k + 1,5 \rho_s) \dots \dots \dots (4.4)$$

Dimana : I_k = Arus fibrilasi (ampere)

R_k = Tahanan badan manusia (Ω)

ρ_s = Tahanan jenis tanah (Ωm)

Maka, nilai tahanan tubuh manusia berada 500 Ω - 3000 Ω disini penulis akan menggunakan nilai 1000 Ω sebagai data dalam perhitungan dan besar nilai tahanan jenis tanah ialah 5,77 Ωm maka dapat dicari batas tegangan sentuh pada berat 50 kg sampai 70 kg.

4.2.5.1 Perhitungan Batas Tegangan Sentuh Pada Berat 50 kg

Diketahui: $I_k = 0,44$ ampere

$$R_k = 1000 \Omega$$

$$\rho_s = 5,77 \Omega m$$

Maka sesuai rumus yang ada akan dimasukan nilai sesuai rumus untuk menemukan nilai batas tegangan sentuh pada berat 50 kg.

Ditanya: tegangan sentuh pada berat 50 kg?

$$E_s = I_k (R_k + 1,5 \rho_s)$$

$$E_s = 0,44 (1000 + 1,5 5,77)$$

$$E_s = 0,44 (1000 + 8,65)$$

$$E_s = 0,44 (1008,65)$$

$$E_s = 443,8 \text{ volt}$$

Jadi, nilai batas tegangan sentuh (E_s) yang mengalir pada berat 50 kg ialah 443,8 volt.

4.2.5.2 Perhitungan Batas Tegangan Sentuh Pada Berat 70 kg

Diketahui: $I_k = 0,60$ ampere

$$R_k = 1000 \Omega$$

$$\rho_s = 5,77 \Omega\text{m}$$

Maka sesuai rumus yang ada akan dimasukan nilai sesuai rumus untuk menemukan nilai batas tegangan sentuh pada berat 70 kg.

Ditanya: tegangan sentuh pada berat 70 kg?

$$E_s = I_k (R_k + 1,5 \rho_s)$$

$$E_s = 0,60 (1000 + 1,5 \cdot 5,77)$$

$$E_s = 0,60 (1000 + 8,65)$$

$$E_s = 0,60 (1008,65)$$

$$E_s = 605,19 \text{ volt}$$

Jadi, nilai batas tegangan sentuh (E_s) yang mengalir pada berat 70 kg ialah 605,19 volt.

Analisis nilai batas tegangan sentuh pada gardu induk 150 kv Bantul dengan berat badan 50 kg sebesar 443,8 volt dan berat 70 kg sebesar 605,19 volt. Bila manusia dialiri tegangan sentuh pada saat gangguan lebih besar dari tegangan yang menjadi batasnya maka manusia tersebut akan mengalami resiko kerusakan organ vital pada tubuhnya karena tegangan yang mengalir sangat besar dan beriko terhadap gagal jantung/kematian.

4.2.6 Perhitungan Batas Tegangan Langkah

Setelah mendapatkan nilai batas tegangan sentuh maka selanjutnya menghitung nilai batas tegangan langkah pada berat 50 kg dan 70 kg dengan masukan yang sama yaitu arus fibrasi, tahanan tubuh manusia, dan tahanan jenis tanah. Berikut rumus yang digunakan:

$$E_{\ell} = I_k (R_k + 6 \rho_s) \dots \dots \dots (4.5)$$

Dimana: I_k = Arus Fibrasi (ampere)

R_k = Tahanan Tubuh Manusia (Ω)

ρ_s = Tahanan jenis tanah (Ωm)

Maka, nilai tahanan tubuh manusia berada 500 Ω - 3000 Ω disini penulis akan menggunakan nilai 1000 Ω sebagai data dalam perhitungan dan besar nilai tahanan jenis tanah ialah 5,77 Ωm maka dapat dicari batas tegangan langkah pada berat 50 kg sampai 70 kg.

4.2.6.1 Perhitungan Batas Tegangan Langkah Pada Berat 50 kg

Dimana: $I_k = 0,44$ ampere

$R_k = 1000 \Omega$

$\rho_s = 5,77 \Omega m$

Maka sesuai rumus yang ada akan dimasukan nilai sesuai rumus untuk menemukan nilai batas tegangan langkah pada berat 50 kg.

Ditanya: tegangan langkah pada berat 50 kg?

$$E_{\ell} = I_k (R_k + 6 \rho_s)$$

$$E_{\ell} = 0,44 (1000 + 6 \cdot 5,77)$$

$$E_{\ell} = 0,44 (1000 + 34,62)$$

$$E_{\ell} = 0,44 (1034,62)$$

$$E_{\ell} = 455,23 \text{ volt}$$

Jadi, nilai batas tegangan langkah (E_{ℓ}) yang mengalir pada berat 50 kg ialah 455,23 volt.

4.2.6.1 Perhitungan Batas Tegangan Langkah Pada Berat 70 kg

Dimana: $I_k = 0,60$ ampere

$$R_k = 1000 \Omega$$

$$\rho_s = 5,77 \Omega\text{m}$$

Maka sesuai rumus yang ada akan dimasukan nilai sesuai rumus untuk menemukan nilai batas tegangan langkah pada berat 70 kg.

Ditanya: tegangan langkah pada berat 70 kg?

$$E_{\ell} = I_k (R_k + 6 \rho_s)$$

$$E_{\ell} = 0,60 (1000 + 6 \cdot 5,77)$$

$$E_{\ell} = 0,60 (1000 + 34,62)$$

$$E_{\ell} = 0,60 (1034,62)$$

$$E_{\ell} = 620,77 \text{ volt}$$

Jadi, nilai batas tegangan langkah (E_{ℓ}) yang mengalir pada berat 50 kg ialah 620,77 volt.

Analisis dari nilai tegangan langkah yang didapat pada berat 50 kg sebesar 455,23 volt dan berat 70 kg sebesar 620,77 volt maka batas tegangan langkah pada berat 50 kg dan 70 kg. Bila melebihi batas tersebut akan beresiko merusak tubuh manusia. Tegangan langkah, bila manusia semakin dekat dengan sumber gangguan maka tegangan dan arus yang mengalir akan besar dan bila manusia semakin jauh maka dampaknya akan semakin kecil.

4.2.7 Tegangan Sentuh Sebenarnya

Tegangan sentuh sebenarnya ialah tegangan sentuh yang terjadi saat ada gangguan diperalatan. Tegangan ini diartikan sebagai tegangan peralatan yang ada pada gardu induk yang diketanahkan terhadap tengah-tengah daerah yang dibentuk konduktor kisi-kisi selama gangguan tanah. Tegangan mesh ini menyatakan tegangan tertinggi yang mungkin timbul sebagai tegangan sentuh yang dapat dijumpai dalam sistem pentanahan gardu induk, dan inilah yang diambil sebagai tegangan untuk disain yang aman.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_m} \dots \dots \dots (4.6)$$

Dimana:

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

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{n}{n_0}}, \quad n_0 = 1 \text{ meter}$$

$$\sqrt{1 + \frac{21}{1}} = 4,6$$

D = Jarak antar konduktor kisi-kisi = 2 meter

n = jumlah konduktor paralel = 21 konduktor

d = Diamer konduktor kisi-kisi = 20mm = 0,022 meter

Setelah mengetahui nilai pada setiap perhitungan K_m maka dimasukkan dalam rumus:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{2^2}{16 \cdot 21 \cdot 0,022} + \frac{(2 + 2 \cdot 21)^2}{8 \cdot 2 \cdot 0,022} - \frac{21}{4 \cdot 0,022} \right] + \frac{1}{4,6} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot 21 - 1)} \right]$$

$$K_m = 0,16 \cdot \left[\ln \frac{4}{7,39} + \frac{1936}{0,352} - \frac{21}{0,088} \right] + 0,21 \cdot \ln \left[\frac{8}{128,74} \right]$$

$$K_m = 0,16 \cdot [\ln 0,54 + 5500 - 238,63] + 0,21 \cdot \ln [0,06]$$

$$K_m = 0,16 \cdot [\ln 5261,91] + 0,21 \cdot \ln [0,06]$$

$$K_m = 0,16 \cdot [8,56] + 0,21 \cdot (-2,81)$$

$$K_m = 1,36 + (-0,59)$$

$$K_m = 0,8$$

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

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 21 = 2$$

ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ωm)

I_g = Arus gangguan tanah (ampere)

L_m = Panjang konduktor dan batang rod (meter)

Setelah mengetahui nilai dari setiap masukan yang ada maka dapat dihitung hasil dari tegangan yang sebenarnya menggunakan rumus yang ada. Berikut perhitungannya:

Diketahui: $K_m = 0,8$

$$K_i = 2$$

$$\rho = 5,77 \Omega m$$

$$I_g = 16909$$

$$L_m = 14109$$

Maka sesuai rumus yang ada akan dimasukan nilai sesuai rumus untuk menemukan nilai tegangan sentuh sebenarnya.

Ditanya: Tegangan Sentuh Sebenarnya (E_m) ?

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_g}{L_m}$$

$$E_m = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 2 \cdot 16909}{14109}$$

$$E_m = \frac{156109,88}{14109}$$

$$E_m = 11,06 \text{ volt}$$

Jadi, nilai tegangan sentuh (E_m) sebenarnya ialah 11,06 volt

Analisis nilai tegangan langkah yang sebenarnya ialah nilai sebesar 11,06 volt pada Sistem Gardu Induk 150 KV Bantul adalah sangat baik karena sistem pentanahan yang bersifat mesh/jala-jala dan saling terhubung dan memiliki jumlah titik pentanahan yang banyak membuat arus gangguan yang terjadi pada setiap peralatan akan teramankan dengan baik. Arus gangguan sebesar 16909 ampere dapat diamankan dengan baik kedalam tanah dengan resiko tegangan sentuh terhadap manusia hanya sebesar 11,06 volt bila tersentuh manusia tidak akan beriko fatal terhadap manusia.

4.2.8 Tegangan Langkah Sebenarnya

Tegangan langkah sebenarnya ialah suatu perbedaan tegangan yang terdapat diantara kedua kaki, bila manusia berjalan di tanah sistem pentanahan pada keadaan terjadi gangguan.

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_g}{L_s} \dots\dots\dots(4.7)$$

Dimana;

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

D = Jarak antar konduktor kisi-kisi = 2 meter

n = jumlah konduktor paralel = 21 konduktor

d = Diameter konduktor kisi-kisi = 20mm = 0,022 meter

maka nilai K_m ialah:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 21} + \frac{1}{2 \cdot 21} + \frac{1}{2} (1 - 0,5^{21-2}) \right]$$

$$K_s = 0,31 \cdot \left[\frac{1}{42} + \frac{1}{42} + 0,5 (1 - 0,5^{19}) \right]$$

$$K_s = 0,31 \cdot [0,02 + 0,02 + 0,5 (1 - 0,0000019073)]$$

$$K_s = 0,31 \cdot [0,54 (0,99)]$$

$$K_s = 0,31 \cdot [0,53]$$

$$K_s = 0,164$$

$$L_s = 0,75 \cdot L_c + 0,85 \cdot L_r \quad (L_c = \text{Total Panjang melintang})$$

$$\quad (L_r = \text{Total panjang Rod})$$

$$L_s = 0,75 \cdot 12944 + 0,85 \cdot 1165$$

$$= 9708 + 990,25$$

$$= 10698$$

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

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 21 = 2$$

$$\rho = \text{Tahanan Jenis Tanah } (\Omega\text{m})$$

$$I_g = \text{Arus gangguan tanah (ampere)}$$

Maka tegangan langkah yang sebenarnya ialah:

$$\text{Diketahui: } K_s = 0,164$$

$$L_s = 10698$$

$$K_i = 2$$

$$\rho = 5,77 \text{ } (\Omega\text{m})$$

$$I_g = 16909 \text{ ampere}$$

Ditanya: Nilai Tegangan Langkah Sebenarnya (E_s)?

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_g}{L_s}$$

$$E_s = \frac{5,77 \cdot 0,164 \cdot 2 \cdot 16909}{10698}$$

$$E_s = \frac{32001}{10698}$$

$$E_s = 2,99 \text{ volt}$$

Jadi, nilai tegangan langkah (E_s) sebenarnya ialah 2,99 volt

4.2.9 Tahanan Ekivalen Rangkaian Pentanahan.

Tahanan ekivalen merupakan tahanan yang mengalir pada rangkaian sebab dari rangkaian tersebut memiliki bahan dan peralatan yang memiliki nilai hambatan listrik. Berikut rumus yang digunakan:

$$R_o = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \dots\dots\dots(4.8)$$

Dimana: r = jari-jari ekivalen dari luas switchyard (meter)

L = Luas Konduktor (meter)

P = Tahanan Jenis Tanah (Ωm)

Maka Nilai dari tahanan ekivalennya ialah sebagai berikut:

Diketahui: $r = 94,5$ meter

$L = 14019$ meter

$P = 5,77$ (Ωm)

Ditanya: Tahanan Ekivalen (R_o)?

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

$$R_o = \frac{5,77}{4 \cdot 94,5} + \frac{5,77}{14019}$$

$$R_o = \frac{5,77}{378} + \frac{5,77}{14019}$$

$$R_o = 0,014 + 0,0003$$

$$R_o = 0,0143 \Omega$$

Jadi, nilai Tahanan Ekivalen (R_o) ialah $0,0143 \Omega$

Hasil Perhitungan pada nilai tahanan jenis, arus fibrasi, tegangan sentuh, tegangan langkah, tegangan sentuh yang sebenarnya, dan tegangan langkah sebenarnya ada pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan

Nomor	Keterangan	Nilai
1	Tahanan Jenis Tanah	5,77 Ω
2	Jumlah Batang Pentanahan	14 Batang
3	Arus Fibrasi untuk berat badan sampel sebesar 50 kg dan 70 kg	0,44 Ampere dan 0,60 Ampere
4	Tegangan Sentuh untuk berat badan sampel sebesar 50 kg dan 70 kg	443,8 Volt dan 605,19 Volt
5	Tegangan Langkah untuk berat badan sampel sebesar 50 kg dan 70 kg	455,23 Volt dan 620,77 Volt
6	Tegangan Sentuh Sebenarnya	11,06 Volt
7	Tegangan Langkah Sebenarnya	2,99 Volt
8	Tahanan Ekvivalen	0,0143 Ω

Analisis pada nilai tegangan sentuh pada Gardu Induk 150 kV Bantul pada berat 50 kg sebesar 443,8 volt, 70 kg sebesar 605,19 volt, dan nilai tegangan sentuh sebenarnya 11,06 volt dengan lama gangguan 0,071 detik dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Tegangan Sentuh Yang Diizinkan berdasarkan Lama Waktu Gangguan berdasarkan IEEE Std 80

Lama Gangguan (Detik)	Tegangan Yang Diizinkan
0,1	1980 Volt
0,2	1400 Volt
0,3	1140 Volt
0,4	990 Volt
0,5	890 Volt
1	626 Volt
2	443 Volt
3	362 Volt

Dengan nilai besar tegangan sentuh lebih kecil dari nilai yang diizinkan dapat dikatakan bahwa tegangan sentuh pada Gardu Induk 150 KV Bantul telah memenuhi standar yang diizinkan.

Nilai Tegangan Langkah pada Gardu Induk 150 KV Bantul adalah sebagai berikut pada berat 50 kg sebesar 445,23 volt, 70 kg sebesar 620,77 volt, dan tegangan langkah sebenarnya 2,99 volt dengan lama gangguan 0,071 detik. Jadi berdasarkan tabel berikut:

Tabel 4.8 Tegangan Langkah Yang Diizinkan berdasarkan Lama Waktu Gangguan berdasarkan IEEE Std 80

Lama Gangguan (Detik)	Tegangan Langkah Yang Diizinkan
0,1	7000 Volt
0,2	4950 Volt
0,3	4040 Volt
0,4	3500 Volt
0,5	3140 Volt

Tabel 4.8 Tegangan Langkah Yang Diizinkan berdasarkan Lama Waktu Gangguan berdasarkan IEEE Std 80 Lanjutan

Lama Gangguan (Detik)	Tegangan Langkah Yang Diizinkan
1	2216 Volt
2	1560 Volt
3	1280 Volt

Berdasarkan tabel 4.8 maka dapat diketahui nilai tegangan langkah pada Gardu Induk 150 KV Bantul sudah memenuhi standar karena tegangan langkah yang ada berada dibawah nilai yang diizinkan berdasarkan lama waktu gangguannya.

Nilai Tahanan ekivalennya yang sebesar $0,0143 \Omega$ sangat baik karena bila tahanan besar maka akan berpengaruh terhadap arus dan tegangan yang mengalir pada sistem pentanahan. Jumlah titik pentanahannya juga sangat banyak karena pada setiap peralatan yang memiliki phasa akan diberikan satu titik pentanahan dan pada setiap titik pentanahan saling terhubung yang sangat baik dalam memproteksi arus gangguan yang ketanah dan peralatan. Jadi dalam pembuatan Gardu Induk 150 KV Bantul ini semua rencana dari lokasi gardu, jumlah titik batang pentanahan, dan luas *switchyard* telah diperhitungkan sebelum pembangunan.

Gardu Induk 150 KV Bantul Telah memenuhi standar dalam hal sistem pentanahan. Nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang didapat telah memenuhi standar IEEE Std.80 *Guide for Safety in AC Substation Grounding* yang diizinkan.

