

BAB IV
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Data Pekerja Teknisi/Operator Gardu Induk 150 KV Kentungan

Pada gardu induk 150 KV Kentungan seperti pada tabel 4.1 yang berisikan nama dan berat badan dari beberapa pekerja pada gardu induk 150 KV Kentungan di bagian teknisi/operator sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Data Teknisi/Operator

No	Nama	Berat Badan (kg)
1	Abid Fahrudin	48
2	Dwi Yulianto	54
3	Subadi	65

Data yang berisikan nama dan berat badan pekerja pada tabel 4.1 sebagai acuan untuk menentukan besarnya nilai arus fibrilasi. Pada IEEE 80 *Guide For Safety in AC Substasion Grounding* mengklasifikasikan berat badan sebagai standard penilaian yang telah di atur sesuai dengan berat badannya.

4.1.2 Setting Relay OCR dan GFR

Pada sistem proteksi yang ada di gardu induk terdapat dua relay yang di jadikan sebagai pengaman arus gangguan lebih ke tanah yaitu Ground Fault Relay (GFR) dan Over Current Relay (OCR). Sistem kerja dari GFR dan OCR bekerja apabila terjadi arus gangguan yang mengalir ke tanah kemudian OCR dan GFR akan bekerja melepaskan dari sistem kelistrikan berdasarkan setting waktu yang di tentukan. Berikut ini pada tabel 4.2 data setting waktu OCR dan GFR pada gardu induk 150 KV Kentungan sebagai berikut:

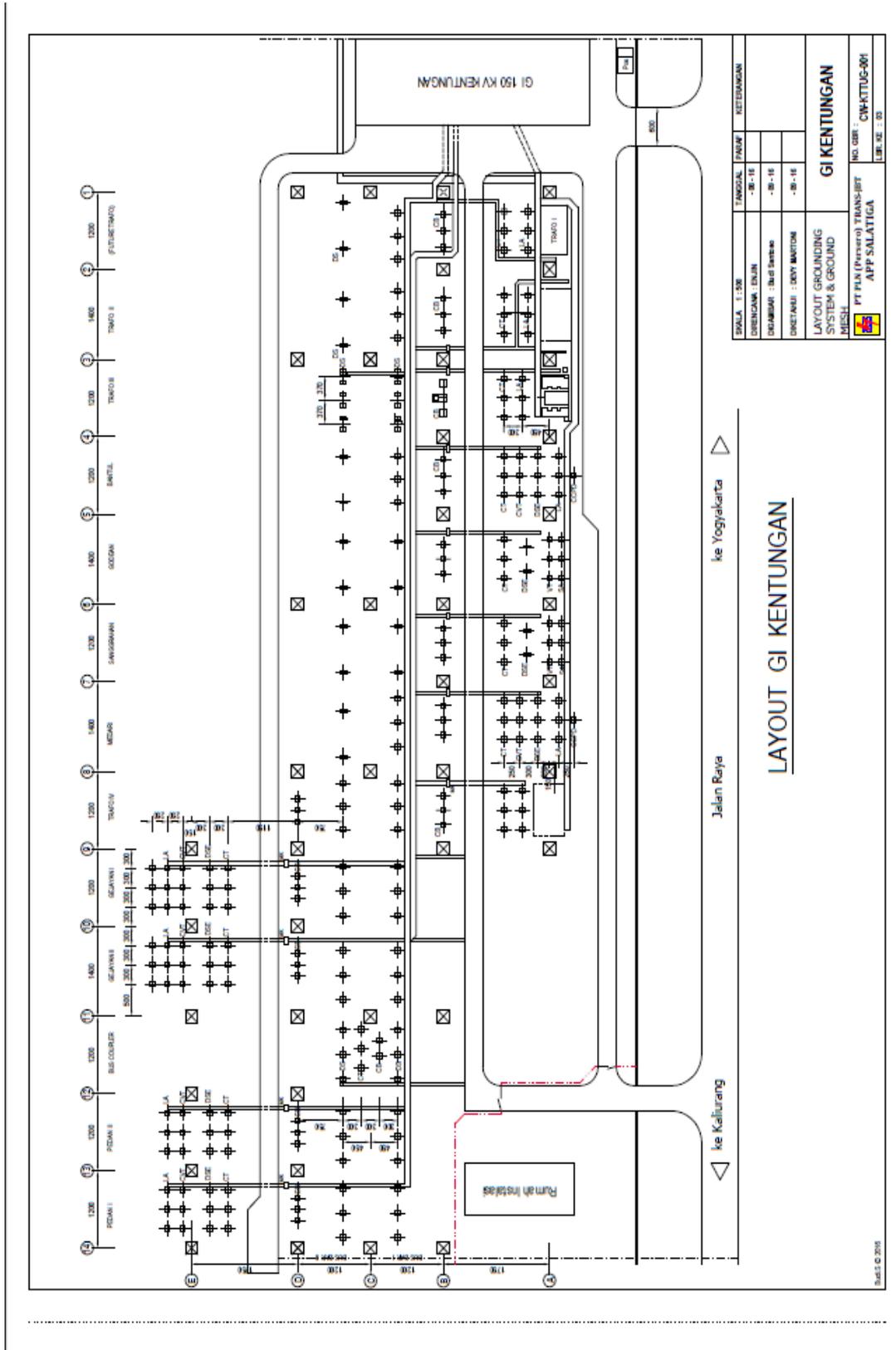
Tabel 4. 2 Tabel Setting Waktu OCR dan GFR

Jenis	Type	Tms (Detik)
OCR	AREVA MICOM P122	0,36
GFR	GFR	0,62

Nilai setting waktu pada OCR dan GFR berbeda hal ini di karenakan perbedaan fungsi. OCR bekerja pada saat terjadi arus lebih pada rangkaian sedangkan GFR bekerja pada saat terjadi arus gangguan yang mengalir ke tanah.

4.1.3 Denah Peletakan Bay dan Jumlah Titik Rod Pada Gardu Induk 150 KV Kentungan

Gardu induk 150 Kv Kentungan memiliki 12 Bay dan setiap bay memiliki titik pentanahan yang di sesuaikan dengan peralatan yang ada dalam setiap bay, yang setiap titik pentanahannya memiliki konduktor rod dan rod tersebut saling terhubung satu dengan yang lainnya membentuk jala-jala (mesh). Berikut ini gambar denah peletakan bay dari Gardu induk 150 KV Kentungan:



Gambar 4. 1 Denah Peletakan Bay Gardu Induk 150 KV Kentungan

Tabel 4. 3 Bay dan Titik Pentanahan

No	Nama Bay	Jumlah Titik Pentanahan
1	Pedan I	3
2	Pedan II	3
3	Bus Coupler	4
4	Gejayan II	3
5	Gejayan I	6
6	Trafo IV	4
7	Medari	5
8	Sanggrahan	5
9	Godean	5
10	Bantul	4
11	Trafo III	4
12	Trafo II	6
Jumlah Titik Pentanahan		52

4.1.4 Data Sistem Pentanahan Mesh Gardu Induk 150 KV Kentungan

Data sistem pentanahan mesh pada gardu induk 150 KV Kentungan di dapatkan pada gardu induk 150 KV Kentungan, di mana data yang ada di dapatkan melalui hasil wawancara secara langsung pada pekerja di gardu induk 150 KV Kentungan. Berikut ini tabel 4.4 menunjukkan sistem pentanahan mesh yang ada di gardu induk 150 KV Kentungan.

Tabel 4. 4 Sistem Pentanahan Mesh Gardu Induk Kentungan

No	Data Desain	Keterangan
1	Luas Switchyard yang Dilindungi Pentanahan	10.496 m ² (164 m x 64 m)
2	Panjang Konduktor Rod	3 Meter
3	Panjang Keseluruhan Rod	2.573,46 Meter

Tabel 4.4 Sistem Pentanahan Mesh Gardu Induk Kentungan (Lanjutan)

No	Data Desain	Keterangan
4	Sifat Permukaan Tanah	$1,75 \times 10^6 \text{ watt/s}$ $\text{m}^3\text{°C}$
5	Tahanan Jenis Tanah	1000 Ω
6	Diameter Konduktor Rod	150 mm
7	Diameter Konduktor Kisi-Kisi	100 mm
8	Kedalaman Penanaman Konduktor Kisi-Kisi	60 cm
9	Jarak Konduktor Paralel Pada Kisi-Kisi	5,88 m
10	Jarak Konduktor Kisi-Kisi	8,803 m

4.1.5 Data Arus Gangguan Gardu Induk 150 KV Kentungan

Arus gangguan merupakan arus yang terjadi akibat kesalahan isolasi pada peralatan maupun gangguan dari luar. Gangguan dari luar terjadi di sebabkan oleh hewan maupun hal yang lainnya. Arus gangguan yang terjadi di rekam dengan menggunakan alat Disturbance Fault Recorder dengan mencatat besarnya arus gangguan yang terjadi. Berikut ini tabel 4.5 Data arus gangguan yang terjadi di gardu induk 150 KV Kentungan.

Tabel 4. 5 Data Arus Gangguan

No	Tanggal Gangguan	Penyebab Gangguan	Arus Gangguan Fasa R	Arus Gangguan Fasa S	Arus Gangguan Fasa T
1	1 Januari 2019	Balon Udara Mengenai Jaringan di U4-20	0	0	0

Tabel 4.5 Data Arus Gangguan (Lanjutan)

No	Tanggal Gangguan	Penyebab Gangguan	Arus Gangguan Fasa R	Arus Gangguan Fasa S	Arus Gangguan Fasa T
2	1 Januari 2019	Balon Udara Mengenai Jaringan di U2-40	4720	431	645
3	3 Januari 2019	FCO Trafo 3 Fasa Putus Kena Burung Gereja di KTN 13-37	517	7975	5864
4	11 Januari 2019	Ledakan	581	5625	484
5	11 Januari 2019	Belum Di Temukan	0	0	0
6	14 Januari 2019	Orang Bangunan Tersengat Listrik di U2-26	0	0	0
7	21 Januari 2019	Jumper TM Putus di U3-9-1	8114	0	0

Tabel 4.5 Data Arus Gangguan (Lanjutan)

No	Tanggal Gangguan	Penyebab Gangguan	Arus Gangguan Fasa R	Arus Gangguan Fasa S	Arus Gangguan Fasa T
8	28 Januari 2019	Ular di Jaringan U7-42F	0	7726	7367
9	30 Januari 2019	Gangguan Tidak di Temukan Bersamaan Petir	0	0	0

Arus gangguan yang terjadi pada tanggal 3 januari 2019 di jadikan sebagai bahan perhitungan, karena gangguan yang terjadi pada bulan januari yang terbesar yaitu pada tanggal 3 januari 2019 yang di akibatkan karena kesalahan yang terjadi pada trafo.

4.2 Perhitungan dan Analisis

Dalam sub bab ini menjelaskan perhitungan dari data-data yang sudah di dapatkan pada saat melakukan penelitian di Gardu Induk 150 KV Kentungan. Kemudian setelah di lakukan perhitungan, hasil dari data perhitungan tersebut di lakukan analisis untuk mendapatkan hasil yang di dapatkan.

4.2.1 Tahanan Jenis Tanah

Berikut ini merupakan perhitungan nilai tahanan jenis tanah yang ada di gardu induk 150 KV Kentungan. Nilai tahanan jenis tanah ini di pengaruh oleh dua faktor yaitu besarnya jarak antar konduktor dan nilai tahanan yang terukur secara langsung pada gardu induk 150 KV Kentungan. Nilai tahanan jenis tanah dapat di hitung dengan rumus:

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

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

a = Jarak antar konduktor kisi-kisi (m)

R = Tahanan terukur (Ω)

Diketahui : $a = 8,803$ Meter

$R = 0,39 \Omega$

Ditanyakan : $\rho = 2 \pi aR$

$\rho = 2 \pi 8,803 \cdot 0,39$

$\rho = 21,57 \Omega\text{m}$

Mengacu pada hasil perhitungan di atas terdapat perbedaan antara nilai tahanan jenis tanah hasil perhitungan $21,57 \Omega\text{m}$ dengan hasil yang ada di lapangan 1000Ω . Hasil dari perhitungan tahanan jenis tanah yang kemudian akan menjadi acuan untuk perhitungan selanjutnya. Tanah yang ada di gardu induk 150 KV Kentungan merupakan jenis tanah pasir kering berikil dan nilai tahanan tanah yang terukur yaitu sebesar $0,39$ masih memenuhi standard dari IEEE std. 80, karena nilai tahanan yang bagus sesuai dengan standard adalah di bawah 5Ω .

4.2.2 Jumlah Batang Pentanahan Yang Diperlukan

Untuk mengetahui jumlah batang pentanahan yang di perlukan pada sistem pentanahan gardu induk 150 KV Kentungan maka perlu di lakukan perhitungan nilai kerapatan arus pada permukaan batang pentanahan. Perhitungan nilai kerapatan arus dapat di hitung 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^3C)

θ = Kenaikan suhu tanah yang diizinkan ($^{\circ}\text{C}$)

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

t = Lama setting waktu gangguan (detik)

Diketahui: $d = 150 \text{ mm}$

$$\delta = 1,75 \times 10^6 \text{ watt/s m}^{30\text{c}}$$

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

$$\rho = 1000 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$$

$$t = 0,62 \text{ detik}$$

Ditanyakan: $i = \dots\dots\dots?$

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} \times d \sqrt{\frac{\delta \theta}{\rho t}}$$

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} \times 150 \sqrt{\frac{1.750.000 \times 50}{1.000 \times 0,62}}$$

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} \times 150 \sqrt{\frac{87.500.000}{620}}$$

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} \times 150 \sqrt{141.129,03}$$

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} \times 150 \times 375,67$$

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} \times 56.350,5$$

$$i = 1,77 \text{ A/cm}$$

Setelah mendapatkan nilai kerapatan arus yang diizinkan kemudian untuk mengetahui jumlah batang pentanahan yang di butuhkan maka kita perlu memasukan nilai arus gangguan dan Panjang batang pentanahan. Untuk mencari jumlah batang pentanahan yang di butuhkan dapat di hitung dengan rumus berikut:

Arus Gangguan Fasa R

$$\frac{\text{arus gangguan}}{\text{panjang batang pentanahan} \times 100 \times \text{kerapatan arus}} = 1 \text{ batang pentanahan}$$

$$\frac{517}{3 \times 100 \times 1,77}$$

Arus Gangguan Fasa S

$$\frac{\text{arus gangguan}}{\text{panjang batang pentanahan} \times 100 \times \text{kerapatan arus}} = 15 \text{ batang pentanahan}$$

$$\frac{7975}{3 \times 100 \times 1,77}$$

Arus Gangguan Fasa T

$$\frac{\text{arus gangguan}}{\text{panjang batang pentanahan} \times 100 \times \text{kerapatan arus}} = \frac{5864}{3 \times 100 \times 1,77} = 11 \text{ batang pentanahan}$$

Berdasarkan hasil perhitungan jumlah batang pentanahan dalam kondisi 3 nilai arus arus gangguan di dapatkan sebanyak 1 batang pentanahan, 15 batang pentanahan, 11 batang pentanahan. Sementara kondisi jumlah batang pentanahan yang ada di lapangan adalah sebanyak 52 batang pentanahan. Terdapat perbedaan antara nilai yang di butuhkan dengan kondisi yang ada di lapangan hal ini di karenakan memperhitungkan aspek resiko arus yang mengalir pada batang pentanahan sedangkan di lapangan lebih di utamakan mengamankan setiap peralatan. Pada satu bay memiliki banyak peralatan maka setiap peralatannya di berikan 1 titik pentanahan. Jumlah batang pentanahan yang ada di gardu induk 150 KV Kentungan sudah memenuhi standar karena jumlah yang ada di lapangan lebih banyak dari jumlah titik pentanahan yang dibutuhkan yang di hitung dengan menggunakan rumus.

4.2.3 Arus Fibrilasi

Pada perhitungan kali ini menghitung nilai arus fibrilasi yang mengalir pada tubuh manusia. Mengacu pada standard IEEE Std.80 besarnya nilai arus fibrilasi terbagi menjadi 2 klasifikasi, yaitu arus fibrilasi dengan berat badan 50 kg dan arus fibrilasi dengan berat badan 70 kg. Berdasarkan data yang di dapatkan beberapa pekerja yang ada di gardu induk 150 KV Kentungan memiliki berat badan yang masih dalam klasifikasi yang ada di IEEE Std.80. untuk menghitung besarnya nilai arus fibrilasi dapat di lakukan perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

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

Dimana: If = Besarnya arus yang melalui tubuh manusia (Ampere)

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

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

$t =$ waktu gangguan (detik)

Berdasarkan data yang di dapatkan pada gardu induk 150 KV Kentungan lamanya gangguan yang terjadi pada saat terjadi gangguan yaitu 85ms = 0,085 detik sedangkan lamanya gangguan yang terjadi sangat jauh berdasarkan setting relai gangguan tanah yaitu 0,62 detik yang artinya relai bekerja sangat baik dalam mengamankan gangguan tanah yang terjadi.

4.2.3.1 Arus Fibrilasi Pada berat 50 kg

Di ketahui: $k_{50} = \sqrt{0,0135} = 0,116$

$t = 0,085$ detik

Di tanyakan: $If = \dots\dots\dots?$

$$If_{50} = \frac{k}{\sqrt{t}}$$

$$If_{50} = \frac{0,116}{\sqrt{0,085}}$$

$$If_{50} = \frac{0,116}{0,291}$$

$$If_{50} = 0,40 \text{ Ampere}$$

4.2.3.2 Arus Fibrilasi Pada berat 70 kg

Di ketahui: $k_{70} = \sqrt{0,0246} = 0,157$

$t = 0,085$ detik

Di tanyakan: $If = \dots\dots\dots?$

$$If_{70} = \frac{k}{\sqrt{t}}$$

$$If_{70} = \frac{0,157}{\sqrt{0,085}}$$

$$If_{70} = \frac{0,157}{0,291}$$

$$If_{70} = 0,54 \text{ Ampere}$$

Berdasarkan dari hasil perhitungan di atas di dapatkan besarnya arus fibrilasi pada berat badan 50 kg adalah 0,40 Ampere dan pada berat bada 70 kg adalah 0,54 Ampere maka nilai ini yang menjadi batas arus yang mengalir pada tubuh manusia dengan berat badan 50 kg dan 70 kg. mengacu pada tabel 2.7 besar arus antara 0-0,9 tidak akan berpengaruh terhadap tubuh manusia apabila tubuh mendapatkan arus yang lebih besar dari itu maka reaksi yang terjadi dimulai dari kejang-kejang dan juga bisa sampai kepada kematian apabila arus yang mengalir pada tubuh sebesar 100 ampere.

4.2.4 Batas Tegangan Sentuh Yang Diizinkan

Setelah di ketahui nilai arus fibrilasi pada berat badan 50 kg dan 70 kg, tahanan jenis tanah dan tahanan tubuh manusia, maka selanjutnya mencari nilai batas tegangan sentuh pada berat badan 50 kg dan 70 kg. Untuk mendapatkan nilai batas tegangan sentuh dapat di lakukan perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

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

Dimana: I_f = Arus fibrilasi (Ampere)

R_k = Tahanan badan manusia (Ω)

ρ_s = Tahanan jenis tanah (Ωm)

Nilai tahanan tubuh manusia berada pada kisaran 500 Ω - 3000 Ω . Mengacu dari hasil penelitian dari beberapa peneliti yang telah melakukan penelitian di bidang ini di dapatkan nilai pendekatan yang di jadikan acuan dalam penulisan ini sebesar 1000 Ω .

4.2.4.1 Batas Tegangan Sentuh Yang Diizinkan Pada Berat 50 kg

Di ketahui: $I_{f50} = 0,40$ Ampere

$$R_k = 1000 \Omega$$

$$\rho_s = 21,57 \Omega m$$

Di tanyakan : $E_s = \dots\dots\dots?$

$$E_{s50} = I_{f50} (R_k + 1,5 \rho_s)$$

$$E_{S50} = 0,40 (1000 + 1,5 \times 21,57)$$

$$E_{S50} = 0,40 (1032,355)$$

$$E_{S50} = 412,942 \text{ Volt}$$

4.2.4.2 Batas Tegangan Sentuh Yang Diizinkan Pada Berat 70 kg

Di ketahui: $I_{f70} = 0,54$ Ampere

$$R_k = 1000 \Omega$$

$$\rho_s = 21,57 \Omega\text{m}$$

Ditanyakan: $E_s = \dots\dots\dots?$

$$E_{S70} = I_{f70} (R_k + 1,5 \rho_s)$$

$$E_{S70} = 0,54 (1000 + 1,5 \times 21,57)$$

$$E_{S70} = 0,54 (1032,355)$$

$$E_{S70} = 557,472 \text{ Volt}$$

Batas nilai tegangan sentuh yang diizinkan pada gardu induk 150 KV Kentungan pada manusia dengan berat badan 50 kg sebesar 412,942 Volt dan pada manusia dengan berat badan 70 kg sebesar 557,472 Volt. Apabila manusia mendapatkan aliran arus tegangan sentuh pada saat terjadinya gangguan lebih besar dari batas tegangan sentuh yang diizinkan maka akan beresiko mengalami kerusakan organ vital pada tubuh bahkan bila arus yang mengalir sangat besar dapat beresiko gagal jantung/kematian.

4.2.5 Batas Tegangan Langkah Yang Diizinkan

Setelah mendapatkan nilai batas tegangan sentuh dengan berat badan 50 kg dan 70 kg maka, selanjutnya di lakukan perhitungan nilai batas tegangan langkah dengan berat badan 50 dan 70 kg dengan rumus sebagai berikut:

$$E_l = I_f (R_k + 6 \rho_s) \dots\dots\dots(4.5)$$

Dimana: I_f = Arus Fibrilasi (Ampere)

R_k = Tahanan badan manusia (Ω)

ρ_s = Tahanan jenis tanah (Ωm)

Nilai tahanan tubuh manusia berada pada kisaran 500Ω - 3000Ω . Mengacu dari hasil penelitian dari beberapa peneliti yang telah melakukan di bidang ini di dapatkan nilai pendekatan yang di jadikan acuan dalam penulisan ini sebesar 1000Ω .

4.2.5.1 Batas Tegangan Langkah Yang Diizinkan Pada Berat 50 kg

Di ketahui: $I_{f50} = 0,40$ Ampere

$$R_k = 1000\Omega$$

$$\rho_s = 21,57\Omega\text{m}$$

Di tanyakan: $E_l = \dots\dots\dots?$

$$E_{l50} = I_{f50} (R_k + 6 \rho_s)$$

$$E_{l50} = 0,40 (1000 + 6 \times 21,57)$$

$$E_{l50} = 0,40 (1129,42)$$

$$E_{l50} = 451,768 \text{ Volt}$$

4.2.5.2 Batas Tegangan Langkah Yang Diizinkan Pada Berat 70 kg

Di ketahui: $I_{f70} = 0,54$ Ampere

$$R_k = 1000\Omega$$

$$\rho_s = 21,57\Omega\text{m}$$

Di tanyakan: $E_l = \dots\dots\dots?$

$$E_{l70} = I_{f70} (R_k + 6 \rho_s)$$

$$E_{l70} = 0,54 (1000 + 6 \times 21,57)$$

$$E_{l70} = 0,54 (1129,42)$$

$$E_{l70} = 609,887 \text{ Volt}$$

Batas nilai tegangan langkah yang diizinkan pada gardu induk 150 KV Kentungan pada manusia dengan berat badan 50 kg sebesar 451,768 Volt dan pada manusia dengan berat badan 70 kg sebesar 609,887 Volt. Bila arus yang mengalir lebih dari nilai batas maka akan beresiko terhadap kerusakan pada tubuh. Nilai tegangan langkah akan semakin besar nilainya apabila manusia berada semakin dekat dengan sumber terjadinya gangguan maka tegangan langkahnya akan semakin

besar dan apabila semakin jauh dari sumber gangguan nilainya akan semakin kecil.

4.2.6 Tegangan Sentuh Sebenarnya

Tegangan sentuh sebenarnya adalah tegangan yang terjadi saat terjadinya gangguan pada peralatan. Tegangan sentuh ini juga dapat diartikan sebagai tegangan peralatan yang ada di gardu induk yang di ketanahkan pada daerah yang di bentuk konduktor kisi-kisi selama gangguan tanah. Untuk mendapatkan nilai tegangan sentuh sebenarnya dapat di hitung dengan rumus sebagai berikut:

$$E_m = K_m K_i \rho \frac{I}{L} \dots \dots \dots (4.6)$$

Dimana:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{8} \times \frac{9}{10} \times \dots \times \frac{2(n-2)+1}{2(n-2)+2} \right)$$

$$K_i = 0,65 + 0,172 n$$

D = Jarak konduktor paralel pada kisi-kisi (meter)

h = Kedalaman penanaman konduktor (meter)

d = Diameter konduktor kisi-kisi (meter)

n = Jumlah konduktor paralel (n=13)

ρ = Tahanan jenis tanah (Ωm)

I = Arus gangguan (Ampere)

L = Panjang konduktor pengetanahan yang di tanam (meter)

Maka nilai K_m dan K_i adalah sebagai berikut :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(5,88^2)}{16 \times 0,6 \times 0,1} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{8} \times \frac{9}{10} \times \frac{11}{12} \times \frac{13}{14} \times \frac{15}{16} \times \frac{17}{18} \times \frac{19}{20} \times \frac{21}{22} \times \frac{23}{24} \right)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln(36,014) + \frac{1}{\pi} \ln(0,322)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} (3,584) + \frac{1}{\pi} (-1,133)$$

$$K_m = 0,570 - 0,360$$

$$K_m = 0,21$$

$$K_i = 0,65 + 0,172 \times 13$$

$$K_i = 0,65 + 2,236$$

$$K_i = 2,89$$

4.2.6.1 Tegangan Sentuh Sebenarnya di Fasa R

Diketahui : $K_m = 0,21$

$$K_i = 2,89$$

$$\rho = 21,57 \Omega\text{m}$$

$$I_R = 517 \text{ A}$$

$$L = 2573,46 \text{ m}$$

Ditanyakan : $Em_R = \dots\dots\dots?$

$$Em_R = K_m K_i \rho \frac{I_R}{L}$$

$$Em_R = 0,21 \times 2,89 \times 21,57 \frac{517}{2573,46}$$

$$Em_R = 13,09 \times 0,20$$

$$Em_R = 2,618 \text{ Volt}$$

Jadi nilai tegangan sentuh sebenarnya saat terjadi arus gangguan pada fasa R adalah 2,618 Volt.

4.2.6.2 Tegangan Sentuh Sebenarnya di Fasa S

Diketahui : $K_m = 0,21$

$$K_i = 2,89$$

$$\rho = 21,57 \Omega\text{m}$$

$$I_S = 7975 \text{ A}$$

$$L = 2573,46 \text{ m}$$

Ditanyakan $Em_S = \dots\dots\dots?$

$$Em_S = K_m K_i \rho \frac{I_S}{L}$$

$$Em_S = 0,21 \times 2,89 \times 21,57 \frac{7975}{2573,46}$$

$$Em_S = 13,09 \times 3,10$$

$$Em_S = 40,579 \text{ Volt}$$

Jadi nilai tegangan sentuh sebenarnya saat terjadi arus gangguan pada fasa S adalah 40,579 Volt.

4.2.6.3 Tegangan Sentuh Sebenarnya di Fasa T

Diketahui : $K_m = 0,21$

$$K_i = 2,89$$

$$\rho = 21,57 \Omega\text{m}$$

$$I_T = 5864 \text{ A}$$

$$L = 2573,46 \text{ m}$$

Ditanyakan : $E_{mT} = \dots\dots\dots?$

$$E_{mT} = K_m K_i \rho \frac{I_T}{L}$$

$$E_{mT} = 0,21 \times 2,89 \times 21,57 \frac{5864}{2573,46}$$

$$E_{mT} = 13,09 \times 2,28$$

$$E_{mT} = 29,845 \text{ Volt}$$

Jadi nilai tegangan sentuh sebenarnya saat terjadi arus gangguan pada fasa T adalah 29,845 Volt.

Berdasarkan hasil perhitungan di atas bahwa nilai tegangan sentuh sebenarnya saat terjadi arus gangguan di fasa R nilainya 2,618 Volt, di fasa S nilainya 40,579 Volt dan di Fasa T nilainya 29,845 Volt. Sistem pentanahan yang ada di gardu induk 150 KV Kentungan sangat baik dengan bentuk sistem pentanahan berupa mesh/jala-jala yang saling terhubung dan memiliki titik pentanahan yang melebihi dari kebutuhannya sehingga arus gangguan yang terjadi pada peralatan teramankan dengan baik.

4.2.7 Tegangan Langkah Sebenarnya

Tegangan langkah sebenarnya yaitu perbedaan tegangan yang terjadi di antara dua kaki apabila manusia berjalan di atas tanah dari sistem pentanahan dalam keadaan terjadinya gangguan. Untuk menghitung nilai tegangan langkah sebenarnya dapat di hitung dengan rumus sebagai berikut:

$$E_{lm} = K_s K_i \rho \frac{I}{L} \dots\dots\dots(4.7)$$

Dimana:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots + \frac{1}{(n-1)D} \right)$$

$$K_i = 0,65 + 0,172 n$$

ρ = Tahanan jenis tanah (Ωm)

I = Arus gangguan tanah (Ampere)

L = Panjang konduktor pengetanahan yang di tanam (meter)

D = Jarak konduktor paralel pada kisi-kisi (meter)

h = Kedalaman penanaman konduktor pengetanahan (meter)

maka nilai K_s dan K_i adalah sebagai berikut :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \times 3} + \frac{1}{5,88+0,6} + \frac{1}{2 \times 5,88} + \frac{1}{3 \times 5,88} + \frac{1}{4 \times 5,88} + \frac{1}{5 \times 5,88} + \frac{1}{6 \times 5,88} + \frac{1}{7 \times 5,88} + \frac{1}{8 \times 5,88} + \frac{1}{9 \times 5,88} + \frac{1}{10 \times 5,88} + \frac{1}{11 \times 5,88} + \frac{1}{12 \times 5,88} \right)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{6,48} + \frac{1}{11,76} + \frac{1}{17,64} + \frac{1}{23,52} + \frac{1}{29,4} + \frac{1}{35,28} + \frac{1}{41,16} + \frac{1}{47,04} + \frac{1}{52,92} + \frac{1}{58,8} + \frac{1}{64,68} + \frac{1}{70,56} \right)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} (0,68)$$

$$K_s = 0,22$$

$$K_i = 0,65 + 0,172 \times 13$$

$$K_i = 0,65 + 2,236$$

$$K_i = 2,89$$

4.2.7.1 Tegangan Langkah Sebenarnya di Fasa R

Diketahui : $K_s = 0,22$

$$K_i = 2,89$$

$$I_R = 517 \text{ A}$$

$$\rho = 21,57 \Omega\text{m}$$

$$L = 2573,46 \text{ m}$$

Ditanyakan : $Elm_R = \dots\dots\dots?$

$$Elm_R = K_s K_i \rho \frac{I_R}{L}$$

$$Elm_R = 0,22 \times 2,89 \times 21,57 \frac{517}{2573,46}$$

$$Elm_R = 13,71 \times 0,20$$

$$Elm_R = 2,742 \text{ Volt}$$

Jadi nilai tegangan langkah sebenarnya saat terjadi arus gangguan pada fasa R adalah 2,742 Volt.

4.2.7.2 Tegangan Langkah Sebenarnya di Fasa S

$$\text{Diketahui : } K_s = 0,22$$

$$K_i = 2,89$$

$$I_s = 7975 \text{ A}$$

$$\rho = 21,57 \text{ } \Omega\text{m}$$

$$L = 2573,46 \text{ m}$$

Ditanyakan : $Elm_s = \dots\dots\dots?$

$$Elm_s = K_s K_i \rho \frac{I_s}{L}$$

$$Elm_s = 0,22 \times 2,89 \times 21,57 \frac{7975}{2573,46}$$

$$Elm_s = 13,71 \times 3,10$$

$$Elm_s = 42,501 \text{ Volt}$$

Jadi nilai tegangan langkah sebenarnya saat terjadi arus gangguan pada fasa S adalah 42,501 Volt.

4.2.7.3 Tegangan Langkah Sebenarnya di Fasa T

$$\text{Diketahui : } K_s = 0,22$$

$$K_i = 2,89$$

$$I_T = 5864 \text{ A}$$

$$\rho = 21,57 \text{ } \Omega\text{m}$$

$$L = 2573,46 \text{ m}$$

Di tanyakan : $Elm_T = \dots\dots\dots?$

$$Elm_T = K_s K_i \rho \frac{I_T}{L}$$

$$Elm_T = 0,22 \times 2,89 \times 21,57 \frac{5864}{2573,46}$$

$$Elm_T = 13,71 \times 2,28$$

$$Elm_T = 31,259 \text{ Volt}$$

Jadi nilai tegangan langkah sebenarnya saat terjadi arus gangguan pada fasa T adalah 31,259 Volt.

4.2.8 Tahanan Ekivalen Rangkaian Pentanahan

Tahanan ekivalen adalah tahanan yang mengalir pada rangkaian hal ini di karenakan rangkaian tersebut bahan dan peralatannya memiliki nilai hambatan listrik. Untuk menghitung nilai hambatan yang ada pada rangkaian pentanahan dapat di hitung dengan rumus berikut:

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

Dimana: ρ = Tahanan jenis tanah (Ωm)

r = Jari-jari ekivalen dari luas switchyard (meter)

L = Panjang konduktor pengetanahan yang di tanam (meter)

Berikut ini nilai dari tahanan ekivalen rangkaian pentanahan adalah sebagai berikut:

Diketahui: $\pi r^2 = 164 \times 64$

$$\pi r^2 = 10496$$

$$r^2 = \frac{10496}{\pi}$$

$$r^2 = 3340,98$$

$$r = \sqrt{3340,98}$$

$$r = 57,80 \text{ Meter}$$

$$\rho = 21,57 \Omega\text{m}$$

$$L = 2573,46 \text{ Meter}$$

Ditanyakan: $R_o = \dots \dots \dots ?$

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

$$R_o = \frac{21,57}{4 \times 57,80} + \frac{21,57}{2573,46}$$

$$R_o = \frac{21,57}{231,2} + \frac{21,57}{2573,46}$$

$$R_o = 0,093 + 8,381 \times 10^{-3} \Omega$$

$$R_o = 0,101 \Omega$$

4.2.9 Pembahasan Hasil Perhitungan

Berikut ini data hasil perhitungan tahanan jenis tanah, arus fibrilasi, batas tegangan sentuh, batas tegangan langkah, tegangan sentuh sebenarnya dan tegangan langkah sebenarnya yang telah di lakukan perhitungan diatas adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan

No	Keterangan	Nilai
1	Tahanan jenis tanah	21,57 Ω m
2	Jumlah batang pentanahan yang di perlukan saat terjadi arus gangguan di fasa R,S,T	1 Batang,15 Batang, dan 14 Batang
3	Arus fibrilasi dengan berat badan 50 kg dan 70 Kg	0,40 Ampere dan 0,54 Ampere
4	Batas tegangan sentuh dengan berat badan 50 kg dan 70 kg	412,942 Volt dan 557,472 Volt
5	Batas tegangan langkah dengan berat badan 50 kg dan 70 kg	451,768 Volt dan 609,887 Volt
6	Tegangan sentuh sebenarnya saat terjadi arus gangguan di fasa R,S,T	2,618 Volt, 40,579 Volt, 29,845 Volt
7	Tegangan Langkah Sebenarnya saat terjadi arus gangguan di fasa R,S,T	2,742 Volt, 42,501 Volt, 31,259 Volt
8	Tahanan ekuivalen rangkaian pentanahan	0,101 Ω

Berdasarkan data hasil perhitungan nilai tegangan sentuh pada gardu induk 150 KV Kentungan dengan berat badan 50 Kg sebesar 412,942 Volt, dengan berat badan 70 KG sebesar 557,472 Volt dan nilai tegangan sentuh sebenarnya sebesar 2,618 Volt, 40,579 Volt, dan 29,845 volt dengang lamanya waktu gangguan yang terjadi 0,085 detik dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 7 Batas Tegangan Sentuh Yang Diizinkan Sesuai dengan IEEE Std.80

Lama gangguan (detik)	Tegangan sentuh 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 hasil perhitungan di bandingkan dengan data pada tabel batas tegangan yang sentuh yang diizinkan berdasarkan IEEE Std.80 dikatakan bahwa besar nilai tegangan sentuh berdasarkan perhitungan nilainya lebih kecil dari batas nilai yang diizinkan. Dengan nilai yang lebih kecil dari batas yang diizinkan bahwa tegangan sentuh yang ada pada gardu induk 150 KV Kentungan telah memenuhi standard yang telah di tentukan pada IEEE Std.80.

Berdasarkan data hasil perhitungan nilai tegangan langkah pada gardu induk 150 KV Kentungan dengan berat badan 50 Kg sebesar 451,768 Volt, dengan berat badan 70 Kg sebesar 609,887 Volt dan nilai tegangan langkah sebenarnya sebesar 2,742 Volt, 42,501 Volt, dan 31,259 Volt dengan lama waktu gangguan 0,085 detik dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 8 Batas Tegangan Langkah Yang Diizinkan Sesuai dengan 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
1	2216 Volt
2	1560 Volt
3	1280 Volt

Dengan nilai hasil perhitungan di bandingkan dengan data pada tabel batas tegangan langkah yang diizinkan berdasarkan IEEE Std.80 bahwa nilai hasil perhitungan nilainya lebih kecil di bandingkan dengan batas nilai tegangan langkah yang diizinkan. Dengan nilainya yang lebih kecil dari batas yang diizinkan nilai tegangan langkah yang ada di gardu induk 150 KV Kentungan sudah memenuhi standard IEEE Std.80.

Nilai tahanan ekivalen rangkaian pentanahan yang di dapatkan berdasarkan hasil perhitungan sebesar 0,101 Ω . Nilai tahanan ekivalen rangkaian pentanahan yang di dapatkan berdasarkan hasil perhitungan nilai yang di dapatkan sangat baik karena apabila nilai tahanan pentanahannya yang di dapatkan besar maka akan berpengaruh terhadap arus dan tegangan yang mengalir pada sistem pentanahan.

Secara keseluruhan gardu induk 150 KV Kentungan telah memenuhi standard sistem pentanahan yang berdasarkan pada standard IEEE Std.80. Nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang di dapat telah memenuhi standard IEEE Std.80 *Guide for safety in Ac Substation Grounding*.