

PENTANAHAN GRID STANDART IEEE 80-2000 PADA GARDU INDUK KRAKSAAN PROBOLINGGO UNTUK MENINGKATKAN KEAMANAN SISTEM PENTANAHAN

¹ Anang Tri Wibowo, ² I Made Wartana

^{1,2} Teknik Elektro S1 ITN Malang, Malang Indonesia

¹anangtriwibowoo@gmail.com, ² m.wartana@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Sistem tenaga listrik yaitu suatu proses dimana energi listrik yang dihasilkan dari pusat - pusat pembangkit listrik dan kemudian disalurkan lewat jaringan - jaringan transmisi menuju ke Gardu Induk (GI) dan kemudian didistribusikan ke pusat beban. Sistem Pentanahan adalah sistem keamanan yang mampu menjaga sistemnya sendirinya dan mampu mengamankan makhluk hidup di sekitarnya dari timbulnya gangguan pentanahan ketika (GI) terjadinya arus gangguan. Dalam sistem pentanahan di perlukan pengkajian ulang setiap tahun agar mengetahui nilai tahanan dari sistemnya sendiri , sehingga mampu menjaga kehandalan sistem proteksi yang ada di GI. Pada perancangan ini menggunakan sistem pentanahan grid - rod dengan kombinasi antara jumlah grid dan rod yang kedalamannya bergantung dari nilai tahanan jenis tanahnya serta luas daerah pentanahan yang akan digunakan, berdasarkan standart IEEE 80-2000.

Kata Kunci: *Groundwing Grid , Tegangan langkah , Tegangan sentuh*

I. PENDAHULUAN

GI merupakan bagian yang tak terpisahkan dari saluran transmisi dan distribusi listrik. Dimana suatu sistem tenaga yang diputuskan pada suatu tempat berisi saluran transmisi dan distribusi, perlengkapan hubung bagi, transformator, dan peralatan pengaman serta peralatan control. Pada GI kemungkinan terjadinya bahaya terutama disebabkan oleh timbulnya gangguan yang menyebabkan arus mengalir ke tanah. Arus gangguan ini akan mengalir pada bagian - bagian peralatan yang terbuat dari metal dan juga mengalir dalam tanah di sekitar GI . Arus gangguan tersebut menimbulkan gradien tegangan pada permukaan tanah itu sendiri [1].

Pada GI kemungkinan terjadinya bahaya terutama disebabkan oleh timbulnya gangguan yang menyebabkan arus mengalir ke tanah. Arus gangguan ini akan mengalir pada bagian - bagian peralatan yang terbuat dari metal dan juga mengalir dalam tanah di sekitar gardu induk. Arus gangguan tersebut menimbulkan gradien tegangan pada permukaan tanah itu sendiri[1].

Untuk mengatasi hal tersebut maka GI harus memiliki sistem pembumian yang handal yang memenuhi standar aman bagi manusia dan peralatan yang berada di area gardu induk. Sistem pembumian yang digunakan harus benar – benar dapat mencegah bahaya ketika pada saat gangguan yang mengalir ke bagian peralatan pembumian dapat dibumikan sehingga gradien tegangan ada di sekitar , karena area pembumian menjadi merata sehingga tidak menimbulkan beda potensial antara titik – titik di sekitar area pembumian [2] .

Dalam perancangan sistem pembumian GI, ada beberapa standar yang diikuti untuk mendapatkan perancangan yang aman dan dapat mencegah timbulnya bahaya gangguan pentanahan Ketika terjadi arus gangguan salah satunya yaitu berdasarkan IEEE Std 80-2000. Dalam IEEE Std 80-2000 ini terdapat konsep – konsep perancangan sistem pembumian GI, mulai dari hal-hal yang harus diperhatikan dalam perancangan, sampai ke langkah – langkah dalam perancangan, yang dijelaskan secara rinci [3].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pentanahan dengan menggunakan sistem grid simetris. Pentanahan dengan sistem grid ini dilakukan dengan menanamkan batang-batang elektroda ke dalam tanah pada kedalamannya beberapa cm, sejajar dengan permukaan tanah dan elektroda tersebut dihubungkan satu dengan lainnya sehingga membentuk beberapa jaringan. Makin banyak konduktor yang ditanam dengan sistem ini, maka tegangan yang timbul pada permukaan tanah pada saat terjadi gangguan ke tanah akan terdistribusi merata. Pada pentanahan sistem grid simetris ini apabila jumlah elektroda pentanahan yang membentuk grid banyak, maka akan menyerupai bentuk pelat dan sangat optimum untuk memperoleh nilai tahanan pentanahan yang kecil [4] .

Rumusan permasalahan yang dapat di rumuskan pada penelitian ini dapat disebutkan sebagai berikut:

1. Bagaimana menganalisis Sistem Pentanahan berbasis IEEE 80-2000 (*IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*)?

2. Bagaimana menghitung Tegangan Sentuh untuk meningkatkan keamanan sistem pentanahan?
3. Bagaimana menghitung Tegangan Langkah untuk meningkatkan keamanan sistem pentanahan?

Sedangkan tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis sistem pentanahan *grid* dari sistem pentanahan GI Kraksaan Probolinggo berbasis IEEE 80-2000 (*IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*)
2. Menghitung Tegangan Sentuh yang memenuhi standar IEEE 80-2000 sehingga meningkatkan keamanan sistem pentanahan..
3. Tegangan Langkah tersebut yang memenuhi standar tersebut sehingga meningkatkan keamanan sistem pentanahan..

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan mulai dikenal pada tahun 1900. Sebelumnya sistem tenaga listrik tidak diketanahkan karena ukurannya masih kecil dan tidak membahayakan. Namun setelah sistem-sistem tenaga listrik berkembang semakin besar dengan tegangan yang semakin tinggi dan jarak jangkauan semakin jauh, baru diperlukan sistem pentanahan. Kalau tidak, hal ini bisa menimbulkan potensi bahaya listrik yang sangat tinggi, baik bagi manusia, peralatan dan sistem pelayanannya sendiri. Sistem pentanahan adalah sistem hubungan penghantar yang menghubungkan sistem, badan peralatan dan instalasi dengan tanah sehingga dapat mengamankan manusia dari sengatan listrik, dan mengamankan komponen-komponen instalasi dari bahaya gangguan listrik. Oleh karena itu, sistem pentanahan menjadi bagian pengaman dari sistem tenaga listrik.

B. Tahanan Pembumian

Pembumian yang ideal harus memberikan nilai tahanan pembumian mendekati nol atau ≤ 1 ohm untuk GI bertegangan tinggi (ANSI/IEEE Std 80-2000). Sebagai perkiraan pertama, sebuah nilai minimum dari tahanan pembumian GI pada tanah yang seragam (*uniform*) untuk lapisan pertama (permukaan tanah) dapat di hitung dengan persamaan

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (1)$$

Kemudian, pada lapisan kedua dengan adanya gabungan grid dan batang rod untuk tanah yang (*uniform*), jumlah konduktor grid dan konduktor batang rod yang di tanam dengan kedalaman tertentu, maka dapat di peroleh persamaan:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (2)$$

dimana:

R_g = Tahanan Pembumian (Ω)

A = Luas area pentanahan (m^2)

ρ = Tahanan jenis tanah ($\Omega - m$)

L_T = Total dari panjang konduktor yang tertanam (m)

Persamaan dalam menentukan tahanan total pembumian yang tanahnya homogen yang terdiri dari grid horizontal dan penghantar rod vertikal. Persamaan di atas di lanjutkan untuk mengetahui tahanan kawat penghantar pembumian disebut (R_1), pada tahanan pembumian grid keseluruhan disebut (R_2), dan (R_m) merupakan tahanan di antara kumpulan penghantar grid dan kumpulan pembumian rod – rod sedangkan (R_g) merupakan tahanan pembumian dapat dilihat pada persamaan:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (3)$$

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (4)$$

Tahanan penghantar pembumian grid (R_1) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi \cdot L_r} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (5)$$

Untuk mencari nilai tahanan penghantar pembumian rod (R_2) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi n_r \cdot L_R} \left[\ln \left(\frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \cdot L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (6)$$

Mutu tahanan pembumian antara (R_1) dan (R_2) yaitu (R_m) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$R_m = \frac{\rho_1}{\pi \cdot L_r} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_R} \right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (7)$$

dimana:

ρ = Tahanan jenis tanah dalam satuan ($\Omega \cdot m$)

L_c = Total panjang penghantar keseluruhan grid yang terhubung dalam satuan (m)

a = Diameter penghantar pembumian grid (mm)

a' = $\sqrt{a \times 2h}$ (m)

A = Area bagian penghantar dalam (m^2)

$k_1 k_2$ = koefisien $k_1 = (-0,04(L_x/L_y)) + 1,41$ dan $k_2 = (-0,15(L_x/L_y)) + 5,5$

L_R = panjang setiap penghantar rod (m)

b = Diameter penghantar rod (m)

n_R = Jumlah penghantar rod

L_c = Total panjang grid (m)

C. Tanah Jenis Tanah

Kondisi jenis dan struktur tanah yang berbeda di sekitar GI menyebabkan adanya perbedaan tahanan jenis terhadap jenis tanah yang berbeda. Berdasarkan PUIL 2000.

Tabel 1. Tahanan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah (ohm-meter)
Tanah Rawa	30
Tanah Liat	100
Tanah Ladang	100
Pasir Basah	200
Krikil Basah	500
Pasir & Krikil Kering	1000
Tanah Berbatu	3000

Sumber : PUIL 2000

D. Konstanta Data

Berikut ini adalah nilai atau konstanta data IEEE 80-2000 yang dimana sudah di uji atau di lakukan penelitian.

Tabel 2. Konstanta Data Berdasarkan IEEE 80-2000

Simbol	Keterangan	Nilai	Satuan
α_r	Koefisien panas resistivitas material pada temperature referensi T_r	0,00393	$1/^{\circ}\text{C}$
ρ_r	Resistivitas konduktor pentahanan pada temperature T_r	1,72	$\mu\Omega/\text{cm}$
$TCAP$	Kapasitas panas persatuan volume	3,42	$\text{J}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}$
T_m	Batas temperature maksimum yang dapat di tahan oleh material	1083	$^{\circ}\text{C}$
T_a	Suhu di lingkungan sekitar area	22,8	$^{\circ}\text{C}$
K_0	Koefisien yang nilainya $1/a_0$	234	$^{\circ}\text{C}$
ρ_s	Resistivitas tanah di bawah permukaan material	8500	$^{\circ}\text{C}$
h_s	Ketebalan permukaan material	0,20	$\Omega - \text{m}$
S_f	Faktor pembagi	0,6	m

Sumber : IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std. 80-2000

E. Ukuran Konduktor

Nilai tahanan dari material elektroda yang digunakan bergantung pada ukuran konduktor yang dipasang. Ukuran konduktor akan dihitung dengan persamaan:

$$A_{mm^2} = I_f \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (8)$$

dimana:

 A_{mm^2} = Luas penampang konduktor yang diperlukan I_f = Arus gangguan t_c = Durasi arus gangguan (detik) α_r = Resistivitas pada suhu refrensi T_r ($1/^{\circ}\text{C}$) ρ_r = Refrensi temperature konduktor T_r ($\mu\Omega/\text{cm}$) $TCAP$ = Kapasitas termal per satuan volume ($\text{J}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}$) T_m = Batas temperature maksimum yang dapat ditahan oleh material ($^{\circ}\text{C}$) T_m = Suhu di lingkungan sekitar area ($^{\circ}\text{C}$) K_0 = Koefisien yang nilainya $1/\alpha_r$ atau $(1/\alpha_r) T_r$ ($^{\circ}\text{C}$)

F. Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah tegangan dimana terdapat suatu objek yang disentuh dan suatu titik berjarak 1 meter, dengan mengamsumsikan bahwa objek yang disentuh terhubung dengan kisi-kisi pembumian yang berada di bawahnya. Tegangan Sentuh memiliki kriteria yang sudah di tetapkan.

Tabel 3. Tegangan Sentuh yang Diizinkan dan Lama Gangguan

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

Sumber : PUIL 2000

Manusia dengan berat badan 50 kg dan 70 kg yang berada diantara satu objek tersebut dapat di hitung dengan persamaan:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (9)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

C_s dapat dianggap juga sebagai faktor koreksi untuk menghitung efektif kaki saat di hadapan dengan ketebalan hingga ke permukaan material. Nilai C_s dapat di cari dengan persamaan:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (11)$$

dimana:

 $E_{touch50}$ = Batas tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat badan 50kg $E_{touch70}$ = Batas tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat badan 70kg C_s = Faktor reduksi nilai resistivitas permukaan tanah ρ_s = Tahanan jenis permukaan material ($\text{ohm} - \text{m}$) t = Waktu gangguan tanah (detik) h_s = Ketebalan lapisan (m)

Dan apabila tidak adanya pengaman yang digunakan pada lapisan permukaan maka dapat diasumsikan dengan $C_s = 1$ dan $\rho_s = \rho$

Untuk pembumian grid ini apabila menggunakan model bujur sangkar ataupun persegi panjang mempunyai batasan yang berdasarkan IEEE 80-2000

1. Jumlah konduktor parallel dalam satu kisi kurang dari 25 ($n < 25$),
2. $0.25 < h < 2.5$ dengan h merupakan kedalaman penanaman konduktor (m)
3. $d < 25$ m, d merupakan diameter penghantar (m)
4. $D < 2.5$ m, D merupakan jarak antara konduktor (m)

G. Tegangan Langkah

Tegangan langkah dapat di artikan tegangan yang timbul di antara dua kaki orang yang sedang berdiri diatas tanah yang sedang dialiri oleh arus gangguan ke tanah, Tegangan Sentuh memilik kriteria yang udah di tetapkan.

Tabel 4. Tegangan Langkah yang Diizinkan dan Lama Gangguan

Lama Gangguan (s)	Tegangan Langkah yang Diizinkan ($volt$)
0,1	7000
0,2	4950
0,3	4040
0,4	3500
0,5	3140
1,0	2216
2,0	1560
3,0	1280

Sumber : PUIL 2000

Manusia dengan berat badan 50kg dan 70kg dapat dihitung tegangan langkahnya dengan persamaan:

$$E_{step50} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (12)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (13)$$

Tegangan langkah maksimum diperkirakan terjadi lebih dari jarak 1 meter, mulai dan memperluas luar konduktor perimeternya pada sudut yang membagi dua sudut. Adapun faktor geometrik tegangan langkah yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{d+h} + \frac{1}{d} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (14)$$

dimana:

K_s = Faktor geometric tegangan langkah

h = Kedalaman pembumian grid (m)

D = Jarak parallel antara konduktor pembumian grid (m)

Adapaun usaha yang dapat di lakukan untuk memperluas persamaan tersebut termasuk penggunaan jumlah penghantar rod ke tanah. Jika L_c adalah total panjang semua batang penghantar grid dan L_R adalah total panjang dari semua batang penghantar rod. Maka nilai efektif panjang penghantar grid untuk tegangan langkah L_s dapat digunakan persamaan:

$$L_s = 0.75 L_c + 0.85 L_R \quad (15)$$

Dan untuk mencari nilai tegangan langkah dapat menggunakan persamaan:

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i L_c}{L_s} \quad (16)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \times n \quad (17)$$

H. Tegangan Mesh

Tegangan mesh E_m adalah salah satu bentuk dari tegangan sentuh. Tegangan mesh dinyatakan sebagai tegangan tertinggi yang mungkin timbul sebagai tegangan sentuh yan dapat dijumpai dalam sistem pembumian GI. Nilai tegangan mesh ini tergantung dengan nilai dari faktor geometric tegangan mesh (K_m), faktor koreksi (K_i), Tahanan tanah (ρ), arus pembumian grid maksimum (L_g) dan nilai efektif panjang penghantar grid untuk tegangan mesh (L_M) dapat dihitung dengan persamaan:

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i L_c}{L_M} \quad (18)$$

Untuk mencari nilai efektif panjang grid dapat dihitung dengan rumus:

$$L_M = L_c + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{L^2 x + L^2 y} \right) \right] L_R \quad (19)$$

Dan untuk mencari nilai faktor geometric untuk tegangan mesh dapat di tentukan rumus:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (20)$$

Untuk pembumian grid yang di pasangkan rod disetiap perimeternya bernilai $k_{ii} = 1$, sedangkan untuk pembumian yang tidak di pasangkan rod dapat di tentukan dengan rumus:

$$k_{ii} = \frac{1}{(2 \times n) \pi} \quad (21)$$

Untuk mencari nilai k_h dapat dicari dengan rumus:

$$k_h = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h}{h_o}}} \quad (22)$$

Dimana untuk nilai $h_o = 1$ m

Pada penghantar grid yang di parallel dengan sebutan n. Dapat dibentuk menjadi bujur sangkar ataupun empat persegi panjang. atau penomoran yang di beraturan atau ekivalen dengan bujur sangkar dapat di hitung dengan rumus:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (23)$$

Dimana:

$$n_a = \frac{2L_c}{L_R} \quad (24)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L}{4 \sqrt{A}}} \quad (25)$$

(Nilai $n_b = 1$ jika berbentuk persegi)

$$n_c = \left[\frac{L_x L_y}{A} \right]^{0.7A} - L_x L_y \quad (26)$$

(Nilai n_c = 1 jika berbentuk persegi dan persegi panjang)

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (27)$$

(Nilai n_d = 1 jika berbentuk persegi dan persegi panjang, dan bentuk L)

diimana:

A = Total arus pembumian *grid* (m^2)

L_x = Panjang maksimum penghantar *grid* pada sumbu x (m)

L_y = Panjang maksimum penghantar *grid* pada sumbu y (m)

D_m = Jarak maksimum antara 2 *grid* (m)

I. Kenaikan Tegangan Tanah

Kenaikan tegangan tanah bias di artikan sabagai maksimum tegangan listrik pada pembumian GI *grid* yang mungkin adanya relatif terhadap jarak nilai pembumian diasumsikan seperti tegangan pada pembumian dengan persamaan:

$$GPR = I_g + R_g \quad (28)$$

dimana:

I_g = Arus rms *grid* simetris (A)

R_g = Tahanan pembumian *grid* (Ω)

J. Arus Gangguan

Arus gangguan ke tanah yang mengalir di tempat gangguan mampu ditempat pengentanahan GI menimbulkan perbedaan tegangan dipermukaan tanah yang dapat mengakibatkan terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dapat melampaui batas batas- batas keamanan manusia dan binatang.[1].

Berdasarkan IEEE Std 80-2000 penentuan arus gangguan yang akan digunakan untuk merancang sistem pengetanahan. IEEE membatasi analisis arus gangguan ke tanah berdasarkan seringnya gangguan yaitu gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dan 3 fasa.

$$I_f = I_a = I_b = I_c \frac{E}{Z^{(1)}} \quad (29)$$

dimana :

E = Tegangan fasa ke fasa

$Z^{(1)}$ = Impedansi urutan positif (Ω)

I_f = Arus gangguan simetris

I_a = Arus fasa a

I_b = Arus fasa b

I_c = Arus fasa c

K. Arus Grid Maksimum

Arus *grid* maksimum dapat diartikan sebagai arus terbesar yang mengalir pada rangkaian pembumian *grid* saat

terjadi gangguan fasa ke tanah dan dapat dihitung dengan persamaan:

$$I_g = S_f \times I_f \quad (30)$$

Adapun nilai perancangan dari arus gangguan maksimum:

$$I_g = D_f \times I_g \quad (31)$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - \frac{-2S_f}{T_a} \right)} \quad (32)$$

$$T_a = X / (100\pi R) \quad (33)$$

dimana:

I_g = Arus gangguan simetris

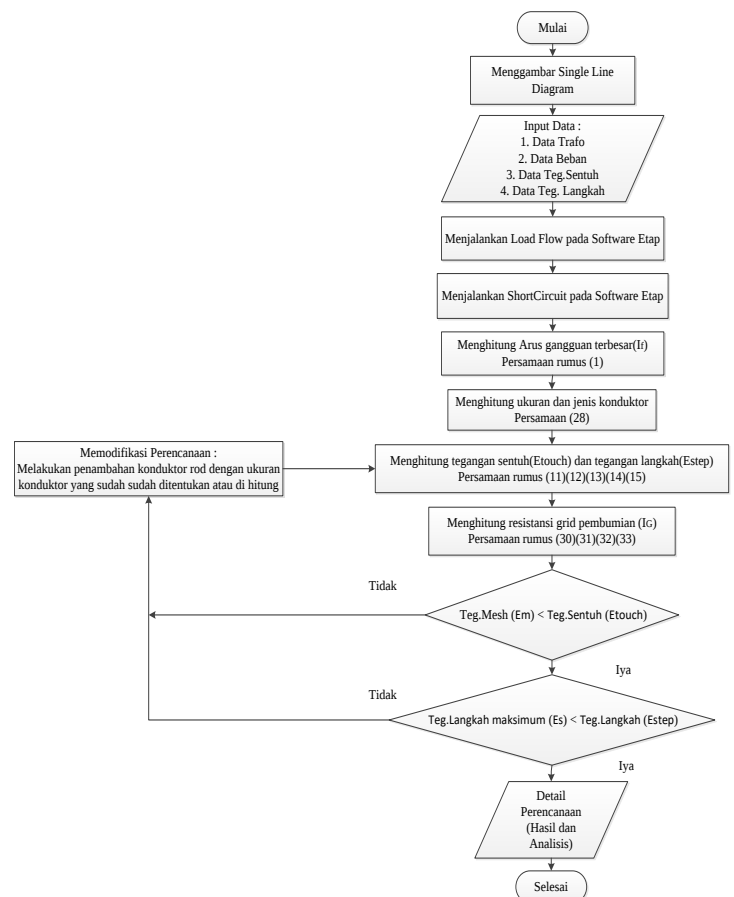
D_f = Faktor Decrement

T_a = DC offset time contant

S_f = Faktor pembagi arus gangguan

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Flowchart



Gambar 1. Flowchart Perancangan Sistem Pentanahan

B. Algoritma Simulasi

Algoritma merancang pentanahan grid

- 1) Mulai.
- 2) Menggambar Single Line Diagram
- 3) Input data: Transformator, Saluran, Petanahan, Beban , Tegangan Langkah , Tegangan Sentuh .
- 4) Menjalankan simulasi *load flow* .
- 5) Menjalankan simulasi *short circuit* .
- 6) Menentukan arus *Ground Fault* terbesar.
- 7) Menghitung arus gangguan terbesar.
- 8) Menghitung ukuran dan jenis konduktor .
- 9) Menghitung kriteria tegangan sentuh (E_{touch}) dan tegangan Langkah (E_{step}) .
- 10) Menghitung resistansi grid.
- 11) Mengecek tegangan Mesh (E_m) < Tegangan sentuh (E_{touch}) yang diizinkan,
 - Jika Ya : Mengecek Batas temperature maksimum yang tegangan langkah (E_s) dan Tegangan Langkah yang diizinkan, (E_{step})
 - Jika Tidak : Menghitung resistansi grid pembedaan (penambahan konduktor, mengganti ukuran konduktor)
- 12) Mengecek Batas temperature maksimum yang tegangan langkah (E_s) < Tegangan Langkah yang diizinkan (E_{step}) .
 - Jika Ya : Hasil
 - Jika Tidak : Menghitung resistansi grid pembedaan (penambahan konduktor, mengganti ukuran konduktor)
- 13) Detail perancangan.
- 14) Selesai.

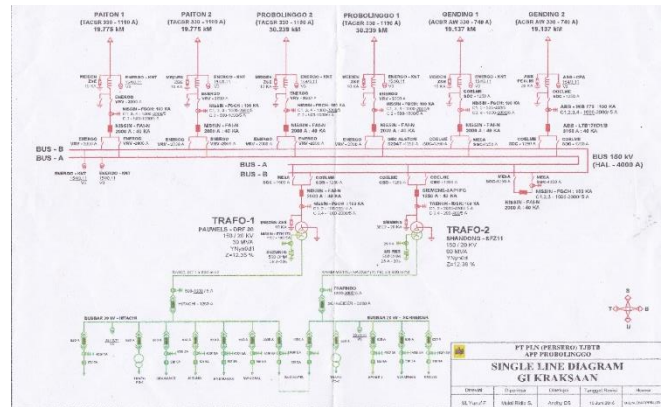
IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan survey di PT PLN (PERSERO) GI Kraksaan Probolinggo 150 kV seperti ditunjukkan Gambar 1.

B. Pengelompokan Data

Data yang berasal dari PT PLN (PERSERO) GI Kraksaan Probolinggo berupa data trafo, data beban, dan data *single line diagram*. Pengolahan data dilakukan dengan analisis perhitungan serta simulasi dengan menggunakan *software ETAP*.



Gambar 2 *Single Line Diagram* GI Kraksaan Probolinggo
Sumber : GI PT PLN (Persero) UPT Kraksaan Probolinggo

1. Data Transformator

Tabel 5. Data Rating Transformator

Trafo	Kapasitas	Sisi Primer	Sisi Sekunder	Number of phases	Frekuensi
T1	60 MVA	150 kV	20 kV	3	50
T2	60 MVA	150 kV	20 kV	3	

Sumber : GI PT PLN (Persero) UPT Kraksaan Probolinggo

2. Data Beban

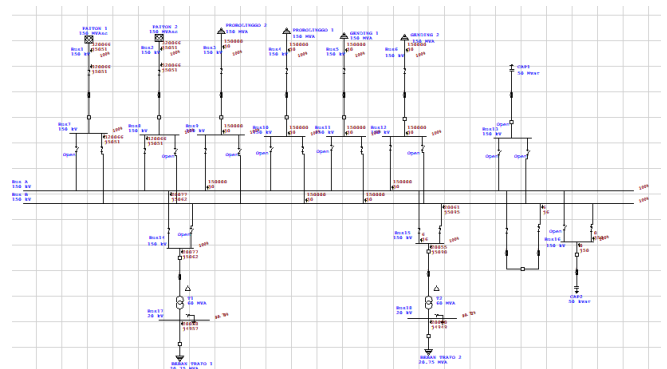
Tabel 6. Daya Beban

Beban	P (MW)	Q (Mvar)
Beban 1	20,144	4,978
Beban 2	20,144	4,978

Sumber : GI PT PLN (Persero) UPT Kraksaan Probolinggo

C. Perancangan Simulasi dengan Software ETAP Power Station

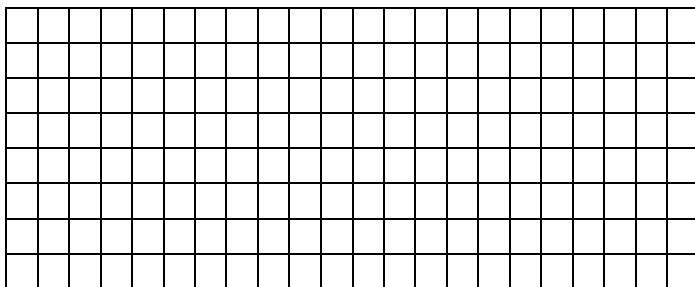
Menggambar *single line diagram* pada lembar kerja ETAP Power Station menggunakan data yang telah didapat dari PT.PLN PERSERO GI Kraksaan Probolinggo dan hasil studi aliran daya ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil *lad Flow* GI Kraksaan Probolinggo

D. Data denah dari GI

GI dengan luas $118 \text{ m} \times 110 \text{ m}$, dengan jarak maksimum grid $D = 7 \text{ m}$, dan kedalaman penanaman grid $h = 0,8 \text{ m}$, jumlah konduktor sejajar sumbu x = 8 buah , jumlah konduktor sejajar sumbu y = 22 buah.

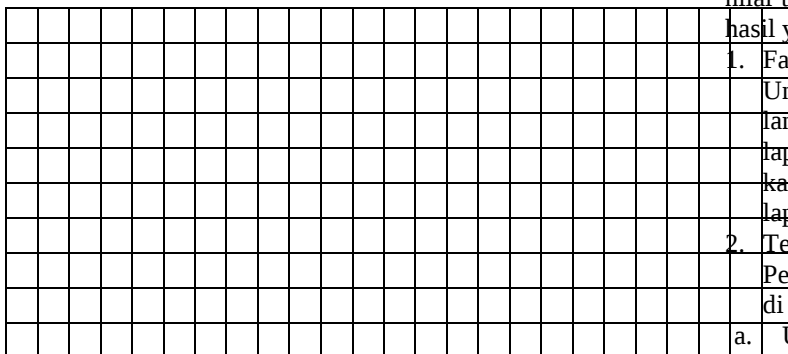


Gambar 4. Data Perencanaan Denah GI Kraksaan Probolinggo

Sumber : GI PT PLN (Persero) UPT Kraksaan Probolinggo

E. Perencanaan penambahan konduktor

GI pada awal dengan jumlah konduktor sejajar sumbu x = 8 buah , jumlah konduktor sejajar sumbu y = 22 buah. Sehingga dapat penambahan konduktor sejajar sumbu x = 12 buah dan jumlah konduktor sejajar sumbu y = 26 buah dengan alasan untuk meningkatkan system pentanahan tersebut .

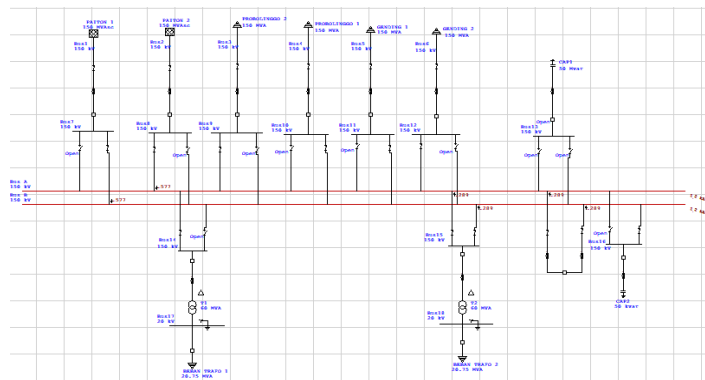


Gambar 5. Data Perencanaan Denah GI Kraksaan Probolinggo

Sumber : Layout perencanaan penambahan konduktor

F. Running Short-Circuit Menggunakan Sistem Solid Grounding PT PLN Persero GI Kraksaan Probolinggo

Dari hasil running short-circuit menggunakan sistem pentanahan efektif grounding (Solid) diketahui arus hubung singkat satu fasa, dua fasa ke tanah dan tiga fasa ke tanah yang terdekat pada sistem Transformator ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Percobaan Short Circuit GI Kraksaan Probolinggo

G. Perhitungan Ukuran Konduktor

Untuk mencari ukuran luas penampang konduktor yang akan digunakan persamaan (8)

$$A_{mm^2} = 6,42 \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3,42 \cdot 10^{-4}}{3,0 \times 10^3 \times 1,72}\right) \ln \left(\frac{234 + 1080}{234 + 22,8}\right)}}$$

maka di dapat $A_{mm^2} = 15,727 \text{ mm}^2$

H. Perhitungan Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah

Pada sub bab ini akan mencari nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah dimana ini akan menjadi acuan apakah nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah masih di bawah hasil yang diizinkan atau diperbolehkan.

1. Faktor reduksi nilai resistivitas permukaan tanah (C_s)

Untuk mencari hasil dari tegangan sentuh dan tegangan langkah, maka terlebih dahulu menentukan faktor reduksi lapisan permukaan tanah (C_s) pada persamaan (11) karena tidak adanya pemangan yang digunakan pada lapisan tanah sehingga hasil $C_s = 1$

2. Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah

Perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah dapat di hitung dengan persamaan (9),(10),(12), dan (13) :

a. Untuk berat badan 50 kg

$$E_{touch50} = (1000 + 1,5 \times 1 \times 3000) \frac{0,116}{\sqrt{1}}$$

$$= 638 \text{ V}$$

$$E_{step50} = (1000 + 6 \times 1 \times 3000) \frac{0,116}{\sqrt{1}}$$

$$= 2204 \text{ V}$$

b. Untuk berat badan 70 Kg

$$E_{touch70} = (1000 + 1,5 \times 1 \times 3000) \frac{0,157}{\sqrt{1}}$$

$$= 863,5 \text{ V}$$

$$E_{step70} = (1000 + 6 \times 1 \times 3000) \frac{0,157}{\sqrt{1}}$$

$$= 2983 \text{ V}$$

Tabel 7. Perbandingan Sebelum Pemasangan *grid* Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah dengan Standart

Tegangan Sentuh dan Tegangan langkah		Standart
$E_{step70\text{ Kg}}$	2983 V	3140 V
$E_{touch70\text{ Kg}}$	863,5 V	890 V

I. Perhitungan Sistem Grid

Untuk mencari nilai efektif jumlah konduktor terlebih dahulu mencari total panjang konduktor dan total faktor reduksi nilai resistivitas permukaan tanah.

J. Total panjang konduktor

Menggunakan persamaan (19):

$$L_c = (8 \times 118) + (22 \times 110)$$

$$= 3364 \text{ m (Data dari GI)}$$

$$L_c = (12 \times 118) + (26 \times 110)$$

$$= 4276 \text{ m (Data penambahan konduktor)}$$

Tabel 8. Perbandingan Sebelum Penambahan konduktor dan sesudah penambahan konduktor

Total panjang konduktor	
<i>Data GI</i>	3364 m
<i>Data penambahan konduktor</i>	4276 m

1. Total panjang keliling pembumian grid

$$L_p = (2(118 + 110))$$

$$= 456 \text{ m}$$

2. Nilai efektif jumlah konduktor

Menggunakan persamaan (23)

$$n_a = \frac{2 \times 3364}{456}$$

$$= 16.82 \text{ (Data GI)}$$

$$n_a = \frac{2 \times 4276}{456}$$

$$= 18.75$$

(Data penambahan konduktor)

$$n_b = 1$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

Tabel 9. Perbandingan Sebelum Penambahan konduktor dan sesudah penambahan konduktor

Total panjang konduktor	
<i>Data GI</i>	16.82
<i>Data penambahan konduktor</i>	18.75

3. Nilai efektif panjang konduktor grid yang di tanam tegangan mesh, dan nilai efektif panjang konduktor grid di tanam untuk tegangan langkah

$$L_m = 3364 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{3}{130^2 + 115^2} \right) \right] 30$$

$$= 4411,13 \text{ m (Data GI)}$$

$$L_m = 4276 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{3}{130^2 + 115^2} \right) \right] 30$$

$$= 4322,50 \text{ m}$$

(Data penambahan konduktor)

$$L_s = 0,75 \times 3364 + 0,85 \times 30$$

$$= 2548,5 \text{ m (Data GI)}$$

$$L_s = 0,75 \times 4276 + 0,85 \times 30$$

$$= 3232,5 \text{ m (Data penambahan konduktor)}$$

Tabel 10. Perbandingan Sebelum Penambahan konduktor dan sesudah penambahan konduktor

Total panjang konduktor	Lm	Ls
<i>Data GI</i>	4411,13 m	2548,5 m
<i>Data penambahan konduktor</i>	4322,50 m	3232,5 m

K. Perhitungan Tahanan Tanah

Mencari nilai tahanan pembumian grid GI dapat di cari dengan persamaan (6) :

$$R_g = 3000 \left[\frac{1}{3364} + \frac{1}{\sqrt{20.7500}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/7500}} \right) \right]$$

$$= 5.71 \Omega \text{ (Data GI)}$$

$$R_g = 3000 \left[\frac{1}{4276} + \frac{1}{\sqrt{20.7500}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/7500}} \right) \right]$$

$$= 5.13 \Omega \text{ (Data penambahan konduktor)}$$

Tabel 11. Perbandingan Sebelum Penambahan konduktor dan sesudah penambahan konduktor .

Total nilai tahanan	
<i>Data GI</i>	6.23 Ω
<i>Data penambahan konduktor</i>	5.3 Ω

L. Perhitungan Arus Grid

Perhitungan arus grid dapat dihitung dengan persamaan (30),(31),(32),dan (33) :

$$T_a = 10 / (100 \times 3,14 \times 10)$$

$$= 0,032 \text{ s}$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0,032}{1} \left(1 - \frac{1}{0,032} \right)}$$

$$= 1,941 \text{ s}$$

$$I_G = 1,941 \times 3852,6$$

$$= 7477,9 \text{ A}$$

M. Perhitungan Kenaikan Tegangan Tanah

Menghitung kenaikan tegangan tanah dapat di cari dengan persamaan (29):

$$GPR = 7477,9 \times 0,55 \\ = 4112,85 \text{ V}$$

N. Perhitungan Tegangan Mesh dan Tegangan Langkah

Untuk mencari nilai tegangan sentuh atau tegangan mesh dan tegangan langkah yang maksimal dapat di cari dengan persamaan (15),(18),(21),(22),dan (23):

$$K_h = \sqrt{1 + 1} \\ = 1,41 \\ K_i = 0,644 + 0,148 \times 11,15 \\ = 2,346 \\ K_m = \frac{1}{2 \times 3,14} \left[\ln \left(\frac{7^2}{16 \times 1 \times 0,0047} + \frac{(7+2 \times 0,8)^2}{8 \times 17 \times 0,0047} - \frac{1}{4 \times 7} \right) + \frac{1}{1} \ln \frac{8}{3,14(2 \times 11,5-1)} \right] \\ = 0,178 \\ K_s = \frac{1}{3,14} \left[\frac{1}{2 \times 0,8} + \frac{1}{7+0,8} + \frac{1}{7} (1 - 0,5^{11,5-2}) \right] \\ = 0,28$$

Dengan begitu nilai tegangan mesh dan tegangan langkah bisa di hitung dengan persamaan (17), (19):

$$E_s = \frac{3000 \times 0,28 \times 2,346 \times 3364}{2548,5} \\ = 2601,22 \text{ V} \\ E_m = \frac{3000 \times 0,178 \times 2,346 \times 3363}{2548,5} \\ = 653,63 \text{ V}$$

Tabel 12. Hasil Perhitungan Analisis Pentanahan

Simbol	Keterangan	Nilai	Satuan
L_c	Total panjang konduktor	3364	M
$E_{touch50}$	Batas tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat 50 Kg	638	V
$E_{touch70}$	Batas tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat 70 Kg	863,5	V
E_m	Tegangan Mesh	653,63	V
E_{step50}	Batas tegangan langkah yang diizinkan untuk berat badan 50 Kg	2204	V
E_{step70}	Batas tegangan langkah yang diizinkan untuk berat badan 70 Kg	2983	V
E_s	Batas temperature maksimum yang tegangan langkah	2601,22	V
R_g	Tahanan tanah	5,13	Ω

V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Arus gangguan yang dihitung yaitu arus gangguan 3 fasa yang terjadi dekat dengan transformator dengan hasil

8090 A yang digunakan untuk menentukan ukuran konduktor.

2. Panjang konduktor untuk grid pembumian yang digunakan adalah 4276 m dengan jumlah konduktor sejajar sumbu x sebanyak 12 buah dan sejajar sumbu y sebanyak 26 buah. Untuk resisntasi sebesar 5,13 Ω yang dikatakan aman menurut standart .
3. Pada perancangan didapatkan nilai tegangan mesh 653,63 < Tegangan sentuh yang diizinkan 863,5 V, begitu juga dengan Tegangan Langkah 2601,22 < Tegangan Langkah yang dizinkan 2983 V, sehingga perancangan yang di buat dikatakan aman.

Saran

Bahwa didapati Tegangan Sentuh dengan berat badan 50 Kg dan 70 Kg dapat disimpulkan bahwa untuk lama gangguan bisa ditentukan pada waktu 0,5 Detik dengan asumsi Tegangan 890 V dan Pada Tegangan Langkah dengan berat badan 50 Kg dan 70 Kg dapat disimpulkan bahwa untuk lama gangguan bisa ditentukan pada waktu 0,5 Detik dengan asumsi Tegangan 3140 V.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suwito, "JURNAL IPTEKS TERAPAN Research of Applied Science and Education V10.i1 (18-23)," vol. 1, pp. 18–23, 2016.
- [2] R. Diamanis *et al.*, "Analisa Jarak Paralel Antara Konduktor Sistem Grounding Grid PLTP Lahendong Unit 5 Dan 6," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, pp. 239–250, 2018.
- [3] W. Hai, H. R. Izadfar, D. Andavari, and S. Shokri, "Desain Sebuah nd Perhitungan Hai f 66KV Netral Grounding Resistor f atau Transformers Utama saya n Bandar Imam Petrochemical Complex (BIPC) Power S tasi," pp. 2349–2353.
- [4] A. Latif, W. G. Ariastina, and I. N. Setiawan, "Probabilitas Tegangan Sentuh Dan Tegangan Langkah Di Lokasi Rencana Gardu Induk 500 kV Antosari," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 15, no. 1, p. 1, 2016, doi: 10.24843/mite.2016.v15i01p01.
- [5] IEEE Std 80, *Guide for Safety In AC Substation Grounding*, vol. 2000, no. February. 2000.
- [6] K. Okuyama *et al.*, "IEEE TRANSACTIONS ON ' I," vol. 667, no. 2, 1980.
- [7] J. P. Nelson, "Sistem Grounding dan Ground-Patahan Perlindungan di Industri Memahami lebih baik," vol. 38, no. 6, pp. 1633–1640, 2002.
- [8] C. S. Payshetti, M. T. Listrik, and P. Systems, "Analisis landasan grid gardu," pp. 1–5, 2017.
- [9] S. Bartien, "Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000," *DirJen Ketenagalistrikan*, vol. 2000, no. Puil, pp. 1–133, 2000.