

**ANALISIS SISTEM PEMBUMIHAN BERBENTUK JARING (GIRD) PADA GARDU
INDUK 150 kV, DI JALAN SUNAN DERAJAT
KECAMATAN LAMONGAN, KABUPATEN LAMONGAN,
JAWA TIMUR**

Disusun Oleh :

Rudi, Dwi Songgo dan Anang
Program Studi Teknik Elektro, FT, UM-Surabaya
Jalan Sutorejo No. 59, Surabaya
Email: rudi.irmawanto@ft.um-surabaya.ac.id

ABSTRAK

Sistem pentanahan peralatan gardu induk menggunakan kisi (gird) dan gabungan antara system pentanahan gird dan pita. Model system pentanahan gird-Pita jarang digunakan untuk gardu induk tegangan tinggi 150 kV. Untuk pembangunan gardu induk yang baru di butuhkan desain yang baru pula. Desain dilakukan dengan membuat kombinasi antara jumlah mesh dan pita-nya, kedalaman penanaman konduktor dengan mempertimbangkan nilai tahanan jenis tanah, pengaruh tahanan jenis tanah untuk beberapa jenis tanah yang berbeda dengan kedalaman yang sama serta dimensi area tanah yang digunakan sehingga menghasilkan nilai tahanan pentanahan 0,01 Ω tegangan sentuh dan tegangan langkah yang lebih baik dan aman.

Sistem pentanahan pada gardu induk merupakan perlengkapan yang amat penting untuk menghindari bahaya-bahaya terhadap orang yang sedang berada di dalam atau di daerah gardu induk tersebut. Ada beberapa metode dalam penyusunan ini, tetapi akhirnya dapat dipilih sesuai dengan kebutuhan ketelitian dan perencanaannya.

Perencanaan dan hasil analisis untuk gardu induk Bagan Batu untuk tegangan sentuh sebenarnya diperoleh sebesar 415 Volt dan tegangan langkah sebesar 426,1 Volt, serta jumlah penanaman konduktor memanjang adalah 10 dan melebar sebanyak 27 buah konduktor yang digunakan adalah 200 mm² dengan ukuran diameter $d = 0,0182$ m.

Kata kunci : Grid, Gardu Induk, Sistem pentanahan

ABSTRACT

Earthing system Substation equipment grounding by using gird and combination between earthing system grid and ribbon. Gird-earth system models Pita infrequent used for High Voltage in Substation 150 kV. To the construction new substations needed a new design. The design will be make by combinations between quantity of mesh and ribbons, The depth of planting the conductor will be considering of resistivity value of the land, the effect of earth resistivity for several different soil types with the same depth as well as the dimensions of the area of land used to produce the grounding resistance value (0,01) touch voltage and voltage step is better and safer.

Substation grounding system in the parent is the attribute that is essential to avoid harm to people who are located within or region of the parent substation. There are several methods described in this thesis, but eventually can be selected according to the needs of accuracy and the planning.

Planning and analysis results for the substation Chart stone to actually touch voltage of 415 Volt and is obtained by voltage step at 426.1 Volt, as well as the number of conductors extending planting is 10 and widened as much as 27 conductors used is 200 mm² with a diameter $d = 0.0182$ m.

Key word : GRID, Substation, earth system

1. PENDAHULUAN

Pembumian atau biasa disebut *grounding system* adalah penanaman elektroda untuk menyalurkan arus lebih ke bumi atau ground. Elektroda bumi adalah penghantar yang ditanam dalam bumi dan membuat kontak langsung dengan bumi, penghantar bumi yang tidak berisolasi yang ditanam dalam bumi dianggap sebagai bagian dari elektroda bumi. Elektroda dibagi menjadi beberapa jenis yaitu : Elektroda Pita, Elektroda Batang dan Elektroda Plat.

Pada Gardu Induk 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 dapat mencegah bahaya ketika pada saat gangguan terjadi, dimana arus gangguan yang mengalir ke bagian peralatan dan ke piranti pembumian dapat dibumikan, sehingga gradient tegangan di sekitar area pembumian menjadi merata sehingga tidak menimbulkan beda potensial antara titik-titik disekitar terjadinya gangguan.

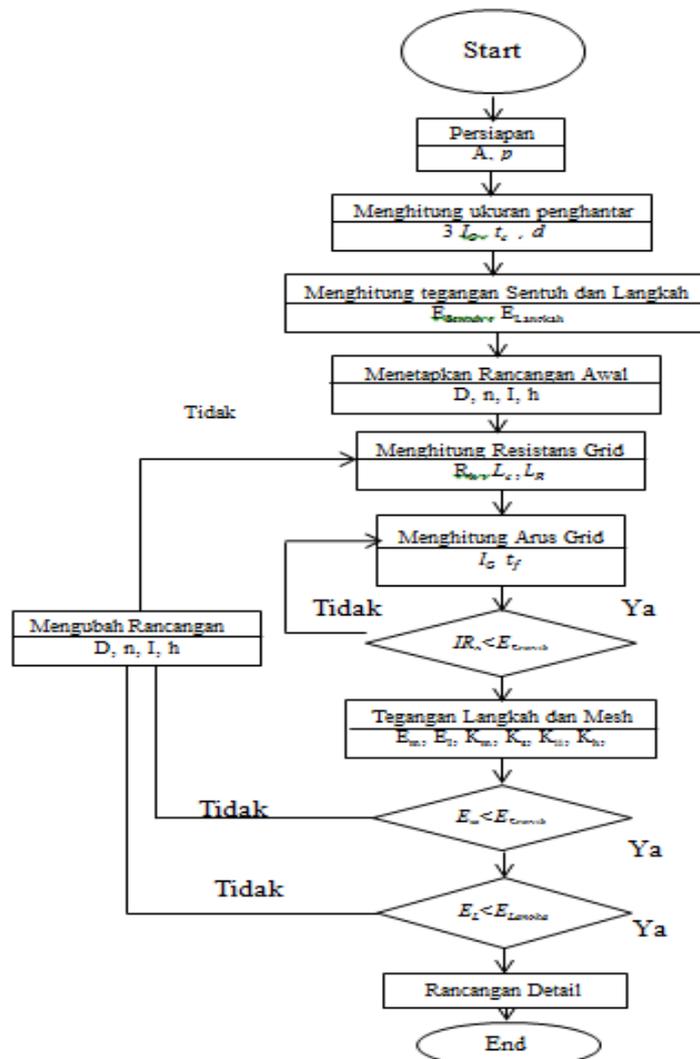
Tujuan utama pembumian adalah untuk memperoleh impedansi yang kecil/rendah dari jalan balik arus hubung singkat ke tanah . Kecelakaan pada personil timbul pada saat hubung singkat ke tanah terjadi. Jadi bila ada arus hubung singkat itu di paksakan untuk mengalir. Impedansi tanah yang tinggi ini akan menimbulkan perbedaan potensial yang besar dan berbahaya. Juga I impedansi yang besar pada sambungan-sambungan rangkaian pembumian dapat menimbulkan besar listrik dan pemanasan yang cukup untuk menyalakan material yang mudah terbakar.

Karena perannya yang sangat penting dalam menyalurkan daya listrik dan menjadi penghubung listrik dari pembangkit ke jaringan transmisi maka dibutuhkan kontinuitas dan keandalan dari gardu induk tersebut maka perlu diterapkan suatu sistem pembumian yang memenuhi persyaratan sistem tegangan.

Sistem pembumian yang digunakan adalah *sistem gird*, dimana sistem pembumian *gird* dilakukan dengan cara menanamkan batang-batang konduktor sejajar dengan permukaan tanah pada kedalaman tertentu.

2. METODE PENELITIAN

Dari gambar 2.1 memperlihatkan diagram blok prosedur perancangan sistem pembumian untuk mencapai tujuan dari pembumian yang menitik beratkan pada pencapaian tegangan sentuh dan tegangan langkah yang aman, Langkah-langkah perhitungan adalah sebagai berikut :



Gambar 2.1. Diagram Alur Perancangan Sistem Pembumian

2.1. Langkah Langkah Penelitian :

2.1.1. Perhitungan Jarak Elektroda

Pada langkah pertama dilakukan penelitian terhadap tanah yang akan ditanam elektroda. Parameter yang diukur adalah jarak elektroda yang akan ditanam α dan resistans jenis tanah ρ . Untuk mengukur resistans jenis tanah, metode empat elektroda Wenner sering dipakai. Elektroda tersebut ditanam dalam tanah membentuk suatu garis lurus, pada jarak α yang sama, dan pada suatu kedalaman b . Tegangan antara dua elektroda yang berada ditengah diukur dan dibagi dengan arus antara dua elektroda terluar untuk memberikan nilai resistans R . Persamaan untuk resistans jenis tanah adalah :

$$\rho = \frac{4 \pi \alpha R}{1 + \frac{2\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4b^2}} \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

dengan :

ρ = Resistans jenis tanah, dalam (Sam)

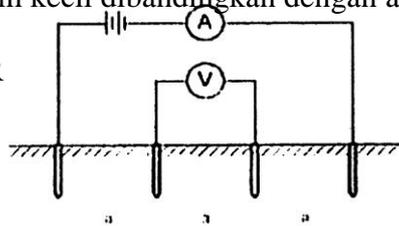
R = Resistans yang dihasilkan dari pembagian tegangan dengan arus yang mengalir pada elektroda, dalam (Ω)

a = Jarak antara elektroda, dalam (m)

b = Kedalaman elektroda, dalam (m)

Jika b lebih kecil dibandingkan dengan a , maka persamaan (2.1) menjadi :

$$P=2\pi aR \quad (2.2)$$



Gambar 2.2 Metode Wenner untuk mengukur resistans jenis tanah (*IEEE-std80*)

2.1.2. Perhitungan Ukuran Penghantar

Pada langkah kedua, pemilihan bahan penghantar harus memperhatikan beberapa hal berikut :

- Memiliki daya hantar yang tinggi.
- Memiliki kekuatan mekanis yang memadai untuk menahan arus yang besar.
- Tahan korosi.

Bahan yang digunakan sebagai elektroda pembumian umumnya tembaga. untuk menghitung arus dari berbagai konduktor adalah :

$$A_{mm^2} = I \sqrt{\frac{\left[\frac{t_c \alpha_r 10^4}{TCAP} \right]}{\ln \left[1 + \left(\frac{I_m - I_a}{K_o + T_a} \right) \right]}} \quad (2.3)$$

dengan :

A_{mm^2} = Luas penampang dari penghantar elektroda, dalam mm^2

I = Arus rms, dalam kA.

t_c = Lama arus gangguan mengalir, dalam detik.

α_r = Koefisien panas dari tahanan jenis pada temperatur T_r .

ρ_r = Tahanan jenis dari penghantar elektroda pada temperatur T_a , dalam $\mu\Omega$ cm.

TCAP = Faktor kapasitas panas, dalam $J/cm^3/^\circ C$.

T_m = Temperatur maksimum yang diizinkan, dalam $^\circ C$.

T_a = Temperatur sekitar, dalam $^\circ C$.

K_o = Konstanta material ($1/\alpha_o$ pada $0^\circ C$).

Besar waktu t_c ditentukan berdasarkan waktu kerja pemutus gangguan.

2.1.3. Menghitung Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah.

Langkah ketiga, dari pers (2.6) dan (2.8), tegangan sentuh dan tegangan langkah keduanya dapat dihitung dengan mengasumsi resistans jenis tanah bersifat seragam, padahal permukaan tanahnya sering dilapisi koral yang berfungsi untuk mereduksi resistans tanah, dengan demikian perlu tambahan koreksi pada persamaan diatas.

Faktor refleksi K dihitung dengan persamaan

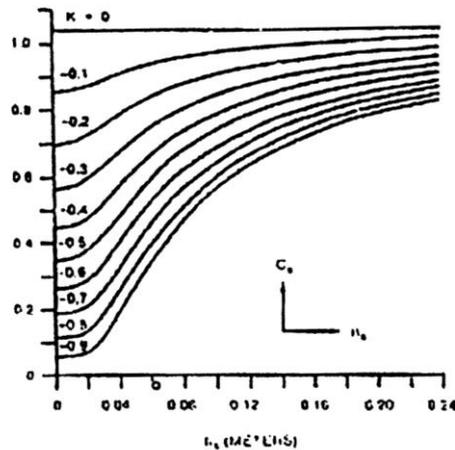
$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (2.4)$$

dengan :

K = Faktor refleksi.

ρ = Resistans jenis tanah [Ωm].

ρ_s = Resistans jenis lapisan korat pada permukaan tanah [Ωm].



Gambar 2.3 Faktor reduksi C_s sebagai fungsi faktor refleksi K dan kedalaman h_s .
(IEEE-std80)

Resistansi dari kedua kaki secara seri dan kedua kaki secara paralel adalah

$$R_{2Fs} = 6(\rho) \quad (2.7)$$

$$R_{2Fp} = 1,5(\rho)$$

dengan :

R_{2Fs} = resistansi kedua kaki seri

R_{2Fp} = resistansi kedua kaki paralel

Pada jenis tanah yang seragam, mengacu pada persamaan (2.5), (2.6) dan faktor reduksi C_s , resistansi dari kedua kaki menjadi :

$$R_{2Fs} = 6 C_s (h_s, K) \rho_s$$

$$R_{2Fp} = 1,5 C_s (h_s, K) \rho_s$$

Batas untuk tegangan Iangkah adalah

$$E_{langkah} = (R_B + R_{2Fs}) I_B \quad (2.8)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.3), (2.4), (2.7) dan (2.7) ke dalam persamaan (2.9) maka diperoleh :

$$E_{langkah 50} = (1000 + 6C_s(h_s K) \rho_s) 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (2.9)$$

atau

$$E_{langkah 70} = (1000 + 6C_s(h_s K) \rho_s) 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (2.10)$$

Tegangan langkah yang sebenarnya, E_L , harus kurang dari tegangan langkah maksimum yang diijinkan, $E_{langkah}$, untuk menjamin keselamatan.

Dengan cara yang sama, batas tegangan sentuh adalah :

$$E_{sentuh} = (R_B + R_{2Fp})I_B \quad (2.11)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.3), (2.4), (2.5) dan (2.8) ke dalam persamaan (3.10) maka diperoleh :

$$E_{sentuh50} = (1000 + 6C_s (hK) \rho_s) 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (2.12)$$

atau

$$E_{sentuh70} = (1000 + 6C_s (h_s K) \rho_s) 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (2.13)$$

dengan :

$C_s = 1$ untuk lapisan permukaan yang tidak dilindungi atau ditentukan dari gambar 3.3 jika menggunakan proteksi lapisan permukaan dari resistans jenis yang tinggi dan tipis

$\rho_s =$ resistans jenis dari permukaan bahan, dalam Q –m

$t_s =$ lamanya arus gangguan, dalam detik

2.1.4. Menetapkan Rancangan Awal.

Langkah ke empat, menetapkan rancangan awal besaran-besaran yang dapat diubah-ubah. Persiapan rancangan meliputi :

- Tata letak pembumian mendatar dan batang-batang tegak
- Jarak antar batang mendatar (D)
- Jumlah batang pembumian tegak (n_r)
- Kedalaman pembumian mendatar (h)
- Panjang keseluruhan elektrode pembumian (L) termasuk grid dan elektrode batang.

Penghitungan jarak antar konduktor dan letak elektrode batang haruslah berdasarkan arus grid I_G dan daerah yang akan dibumikan. Besaran-besaran ini dapat diganti pada perhitungan selanjutnya bila hasil akhirnya tidak memenuhi persyaratan.

2.1.5. Menghitung Resistans Pembumian.

Langkah kelima, untuk menghitung resistans pembumian, untuk kedalaman grid antara 0,25 - 2,5 m, resistans pembumian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Sverak, yaitu :

$$R_s = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (2.14)$$

Jumlah resistansi yang terdiri dari sebuah kombinasi elektrode mendatar (grid) dan elektrode tegak (batang), lebih rendah dari resistansi masing-masing elektrode, tetapi masih lebih tinggi dari kombinasi paralelnya. Total resistansinya adalah :

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 R_{12}} \quad (2.15)$$

dengan :

$R_1 =$ resistans elektrode pembumian mendatar

$R_2 =$ resistans elektrode pembumian tegak

R_{12} = resistans bersama antara elektrode mendatar dan tegak.

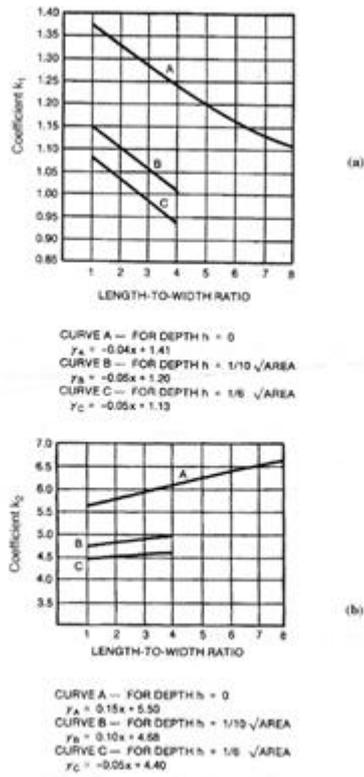
Schwarz mengembangkan rumus untuk R_1 , R_2 , dan R_{12} pada parameter dasar perancangan diasumsikan pada kondisi keadaan tanah yang seragam. Pada prakteknya, diperlukan sekali untuk menanam elektrode sedalamdalamnya hingga mencapai lapisan tanah yang lebih konduktif. Nilai R_1 , R_2 , dan R_{12} dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} R_1 &= \left(\frac{\rho_1}{\pi L_1}\right) \left[1n\left(\frac{2L_1}{h}\right) + K_1\left(\frac{L_1}{\sqrt{A}}\right) - K_2\right] \\ R_2 &= \left(\frac{\rho_2}{2n\pi L_2}\right) \left[1n\left(\frac{8L_2}{d_2}\right) - 1 + K_1\left(\frac{L_2}{\sqrt{A}}\right) (\sqrt{n_r} - 1)^2\right] \\ R_{12} &= \left(\frac{\rho_1}{\pi L_1}\right) \left[1n\left(\frac{2L_1}{L_2}\right) + K_1\left(\frac{L_1}{\sqrt{A}}\right) - K_2 + 1\right] \end{aligned} \quad (2.16)$$

(IEEE-std80)

dengan :

- ρ_1 = Resistans jenis tanah disekitar elektrode pembedaan mendatar pada kedalaman h, dalam Ω -m
- ρ_a = Resistans jenis tanah dilihat dari elektrode pembedaan tegak, dalam Ω -m
- L_1 = Total panjang elektrode mendatar, dalam meter
- L_2 = Rata-rata panjang elektrode tegak, dalam meter
- h = Kedalaman penanaman elektrode mendatar, dalam meter
- h' = $\sqrt{d_1 h}$ d, h untuk elektrode mendatar pada kedalaman h, atau 0,5 d_1 , untuk elektrode mendatar pada permukaan bumi ($h = 0$)
- n_r = Jumlah batang pembedaan tegak pada luas A
- A = Luas daerah yang dicakup oleh elektrode mendatar dimensi a x b, dalam m^2
- a = Sisi panjang dari luas daerah elektrode mendatar, dalam meter
- b = Sisi lebar dari luas daerah elektrode mendatar, dalam meter
- K_1, K_2 = Konstanta dari geometri konduktor (lihat gambar 2.4(a) dan (b))
- ρ_2 = Resistans jenis tanah dari kedalaman H, dalam Ω -m
- d_1 = Diameter elektrode mendatar, dalam meter
- d_2 = Diameter elektrode tegak, dalam meter
- H = Ketebalan lapisan tanah di permukaan bumi, dalam meter



Gambar 2.4. Koefisien K_1 (a) dan K_2 (b) dari persamaan Schwarz. (IEEEstd80)

Pada jenis tanah dengan dua lapisan, untuk $\rho_1 \geq \rho_2$, dimana elektrode grid terletak pada lapisan atas ρ_1 , tetapi elektrode batang sebagian pada ρ_1 dan sebagian lagi pada ρ_2 , R_2 dan R_{12} dihitung dengan menggunakan resistans jenis tanah dilihat dari elektrode pembumian tegak. Persamaan untuk ρ_a jika setiap ujung atas elektrode pembumian tegak sama rata dengan permukaan bumi adalah :

$$\rho_a = \frac{L_2 (\rho_1 \rho_2)}{[\rho_1 H + \rho_2 (L_2 - H)]} \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.17)$$

Untuk ujung atas elektrode pembumian tegak sama dengan kedalaman elektrode grid, maka persamaannya :

$$\rho_a = \frac{L_2 (\rho_1 \rho_2)}{[\rho_1 (H-h) + \rho_2 (L_2 + h - H)]} \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.18)$$

Untuk lapisan tanah yang seragam, $\rho_2 = \rho_1$ sehingga $\rho_a = \rho_1$

2.1.6. Menghitung Arus Grid Maksimum.

Langkah keenam, menghitung arus grid adalah bagian dari arus gangguan simetris ke bumi yang mengalir diantara elektroda grid dengan tanah disekitarnya, dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$I_g = S_f I \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.19)$$

dengan :

- I_g = arus grid simetris, dalam A
- S_f = faktor pembagi arus
- I_f = nilai rata-rata dari arus gangguan simetris ke bumi, dalam A

Arus hubung singkat 3 fasa simetris digunakan untuk mengukur ukuran penghantar dari konduktor mesh utama tetapi 60 % dari arus hubung singkat 3 fasa simetris sebagai arus gangguan ketanah digunakan untuk perhitungan tegangan sentuh, tegangan langkah dan kenaikan tegangan jaring maksimum, sebagai berikut :

$$I_g = \frac{3V_{1,N}}{Z_1+Z_2+Z_0} \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.20)$$

Dengan $Z_1 = Z_2$. $Z_0 = 3Z_1$ (Z_0 berasal dari impedansi peralatan dari jaringan pada masing - masing gardu induk. Harga impedansi dari PLN tidak didapat, maka diasumsikan Z_0 adalah $3Z_1$ untuk penggunaan umum pada sistem tegangan tinggi).

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{3V_{1,N}}{Z_1+Z_2+Z_0} && (\text{IEEE-std80}) && (2.21) \\ &= \frac{3V_{1,N}}{5 Z_1} \\ &= \frac{3}{5} \cdot I_p \\ I_g &= 0,6xI_p \quad (I_p = \text{ arus hubungan singkat 3 fasa simetris}) \end{aligned}$$

Arus grid maksimum dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$I_G = C_p D_f I_g \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.22)$$

Dengan:

- I_G = arus grid maksimum, dalam A
- C_p = faktor koreksi arus gangguan pada masa mendatang, jika sistem tidak berkembang lagi, maka $C_p = 1$
- D_f = faktor pelemahan selama waktu gangguan t_f

2.1.7. Menghitung Kenaikan Potensial Bumi.

Langkah ketujuh menentukan GPR (Ground Potential Rise) atau kenaikan potensial bumi terjadi karena adanya arus yang mengalir pada sistem yang dibumikan. Besarnya kenaikan tersebut dapat dihitung dengan :

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (2.23)$$

- GPR = kenaikan potensial bumi, dalam V
- I_G = arus gangguan yang mengalir ke bumi, dalam A
- R_g = resistans pembumian total, dalam Ω .

Jika kenaikan potensial bumi yang didapat lebih kecil dari tegangan sentuh yang diperbolehkan, maka tidak perlu untuk melakukan penghitungan tahap selanjutnya. Dan apabila kenaikan potensial bumi lebih besar, maka tegangan mesh dan tegangan langkah haruslah dihitung.

2.1.8. Menghitung Tegangan Mesh Dan Tegangan Langkah.

Langkah kedelapan menentukan tegangan mesh adalah tegangan sentuh maksimum yang terjadi antara elektrode pembumian mendatar. Persamaannya adalah:

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L} \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.24)$$

Dengan:

E_m = tegangan mesh, dalam V

ρ = resistans jenis tanah (=pi), dalam S2-m

K_M = faktor ruang untuk menghitung tegangan mesh

K_i = faktor koreksi geometri elektrode pembumian mendatar

L_G = arus grid maksimum, dalam A

L = panjang elektrode pembumian total, dalam meter

Konstanta K_m dan K_i , dihitung dengan persamaan :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[1n \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{K_{ii}}{K_h} 1n \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.25)$$

dengan :

K_{ii} = faktor koreksi berat yang menyesuaikan efek dari inti konduktor pada sudut mata jala

= 1 untuk elektrode mendatar dengan dilengkapi elektrode tegak disemua titik, atau untuk elektrode mendatar dengan elektrode tegak di setiap sudutnya

$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$ untuk elektrode mendatar tanpa elektrode tegak atau elektrode mendatar hanya dengan beberapa elektrode tegak dan tidak dipasang pada setiap sudutnya atau sekelilingnya

K_h = faktor koreksi berat yang menegaskan efek dari kedalaman elektrode mendatar

$$= \sqrt{1 + h/h_0} \quad (2.26)$$

h_0 = 1 meter (acuan kedalaman dari elektrode mendatar)

$$K_1 = 0,656 + 0,172n \quad (2.27)$$

dengan :

n = jumlah konduktor paralel di satu sisi (panjang atau lebar)

$n = \sqrt{n_B n_B}$ untuk penghitungan tegangan mesh

Jika L_c , adalah total panjang konduktor elektrode mendatar dan L_r adalah total panjang konduktor elektrode tegak, maka untuk menghitung tegangan mesh elektrode mendatar dengan dilengkapi elektrode tegak digunakan persamaan :

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_G + 1,15L_r} \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.28)$$

Faktor pengali 1,15 untuk L_r pada persamaan diatas menggambarkan bahwa kepadatan arus lebih tinggi pada elektrode tegak di sekeliling elektrode mendatar daripada di elektrode mendatar itu sendiri.

Untuk elektrode mendatar tanpa elektrode tegak, atau hanya beberapa elektrode batang yang dipasang di elektrode mendatar tetapi jauh dari sisinya, persamaannya adalah :

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_s}{L_G + L_r} \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.29)$$

Sedangkan untuk tegangan langkah dihitung dengan persamaan $E_l = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L}$

$$E_l = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_c + L_r} \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.30)$$

dengan :

K_s = faktor ruang untuk menghitung tegangan langkah

Persamaan (3.30) untuk elektrode mendatar tanpa elektrode tegak atau hanya beberapa elektrode batang yang dipasang di tengah dan jauh dari sisi-sisinya. Sedangkan persamaan untuk elektrode mendatar dengan dilengkapi elektrode tegak terutama di sekitar sisi-sisinya adalah :

$$E_l = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_G + 1,15 L_r} \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.31)$$

Tegangan langkah maksimum diasumsikan terjadi pada jarak yang sama dengan kedalaman h elektrode mendatar. Kedalaman elektrode yang di pasang biasanya $0,25 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$. K_s dihitung dengan persamaan :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (\text{IEEE-std80}) \quad (2.32)$$

dengan :

$n = \max (n_A, n_B)$, untuk penghitungan tegangan langkah

Penggunaan K_s yang berbeda-beda tergantung pada kedalaman elektrode mendatar h , yang menggambarkan bahwa tegangan langkah menurun dengan cepat disebabkan meningkatnya kedalaman.

2.1.9. Perbandingan Tegangan Mesh Dengan Tegangan Sentuh.

Langkah kesembilan apabila tegangan mesh lebih kecil dari tegangan sentuh, maka perancangan dapat dianggap selesai. Selesaiannya rancangan juga tergantung dari 3.1.10. Namun bila tegangan mesh lebih besar dari tegangan sentuh, maka haruslah menjalankan 3.1.11.

2.1.10. Perbandingan Tegangan Langkah Dan Tegangan Langkah Yang Diperbolehkan.

Langkah kesepuluh, apabila tegangan langkah lebih kecil dari tegangan langkah yang diperbolehkan, maka selesai. Namun bila tegangan langkah lebih besar dari tegangan langkah yang diperbolehkan, maka ke 2.1.11 yaitu merubah rancangan awal.

2.1.11. Merubah Rancangan Awal.

Langkah kesebelas, jika tegangan mesh lebih besar dari tegangan sentuh (3.9) dan tegangan langkah lebih besar dari tegangan langkah yang diperbolehkan (3.10), maka perlu merubah rancangan awal yaitu dengan mengganti jarak antar batang

mendatar D, jumlah batang pembumian tegak n_r , panjang keseluruhan elektrode pembumian L, dan kedalaman pembumian mendatar h.

2.1.12. Rancangan Detil.

Langkah duabelas, setelah nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang aman telah dicapai, mungkin diperlukan untuk menambah konduktor pada elektrode mendatar dan elektrode tegak. Penambahan ini diperlukan bila rancangan elektrode mendatar tidak termasuk konduktor di dekat peralatan yang dibumikan seperti penangkal petir.

2.2. Panjang Konduktor Minimum Yang Diperlukan.

Panjang konduktor yang diperlukan untuk grid pada suatu gardu induk tergantung beberapa pertimbangan, diantaranya: tegangan sentuh atau tegangan langkah yang dikehendaki, luas daerah yang diamankan dan factor ekonomisnya. Dengan menggunakan konduktor yang lebih panjang dari hasil perhitungan minimal panjang konduktor yang dibutuhkan, maka faktor keselamatan manusia disekitarnya lebih diutamakan. Tetapi ha! ini tidak ekonomis karena konduktor yang dibutuhkan menjadi lebih banyak sehingga lebih mahal. Dengan menggunakan konduktor yang tidak terlalu panjang, maka biaya akan lebih murah (ekonomis) tetapi faktor keselamatan manusia disekitarnya tidak terjamin. Sangat diharapkan sekali faktor ekonomis menjadi persyaratan dalam perancangan pembumian.

Untuk mendapatkan kondisi yang aman bagi keselamatan manusia, maka tegangan mesh harus dibatasi sampai pada tegangan sentuh yang diizinkan sesuai peramaan (2.13), maka :

Untuk $E_m < E_{sentuh\ 50}$

$$\frac{K_i \rho I_G}{L} < (1000 + 1,5 \cdot C_s(h_s, K) \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.33)$$

Dengan merubah persamaan (2.37) untuk L maka didapat :

$$L > \frac{K_m \cdot K_i \cdot \rho \cdot I_G \cdot \sqrt{t_s}}{(116 + 0,174 \cdot C_s(h_s, K) \rho_s)} \quad (2.34)$$

Untuk $E_m < E_{sentuh\ 70}$ dari peramaan (2.27) dan (2.14)

$$\frac{K_m K_i \rho I_G}{L} < (1000 + 6 \cdot C_s(h_s, K) \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.35)$$

$$\text{maka : } > \frac{K_m \cdot K_i \cdot \rho \cdot I_G \cdot \sqrt{t_s}}{(157 + 0,235 \cdot C_s(h_s, K) \rho_s)} \quad (\text{IEEE-std80})$$

Elektroda berbentuk jaring (grid) adalah bentuk elektroda yang merupakan modifikasi dari elektroda pita, dimana bentuknya menyerupai jaring atau jala - jala. Bentuk elektroda ini merupakan bentuk dasar pentanahan pada suatu gardu induk (GI) dan bagi faktor keselamatan manusia. Elektroda- ini biasanya ditanam pada kedalaman 0,5 - 1 meter dan bentuknya bisa bujur sangkar, segi empat atau bentuk lainnya. Tergantung tempat yang diamankan, terutama tempat yang terdapat peralatan digardu induk.

Arus gangguan akan mengalir dengan menyebar keseluruh jaring sehingga arus yang ketanah akan menjadi lebih kecil. Hal ini lebih baik bila dibandingkan dengan menggunakan hanya satu elektroda batang saja. Pemasangan elektroda batang pada bentuk bujur sangkar maupun segi empat dapat berupa diagonal maupun disepanjang sisi - sisinya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Perhitungan Pembumian

Alat yang digunakan untuk mengukur resistans pembumian adalah KYORITSU tipe 3125 dengan metode pengukuran menggunakan metode Wenner. Data hasil pengukuran seperti terdapat pada lampiran adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1. Data hasil pengukuran resistans jenis tanah.

Jarak Elektroda (a) (m)	Resistans (R) (Ω)	Resistans Jenis Tanah (ρ) (Ω -m)
1	3 2	201
2	0,8	105
3	0,33	6,2
6	0,1	4,5
9	0,07	3,6
12	0,037	2,9
18	0,025	2,3
24	0,02	3,2
30	0,018	3,9

Perhitungan ini dilakukan untuk mendisain system pembumian dan menetapkan batasan yang aman untuk perbedaan potensial yang mungkin terjadi pada gardu induk yang mengalami kondisi gangguan.

Resistans jenis tanah pada table diatas dihitung dengan menggunakan persamaan (3.2). Dari table tersebut dapat dilihat bahwa semakin jauh penanaman elektroda, maka semakin kecil nilai resistans yang didapat, maka semakin kecil pula resistans jenis tanahnya.

Besarnya arus gangguan ketanah adalah 31, 5 kA dengan lamanya arus gangguan 1 detik. Konduktor yang digunakan adalah Commercial Hard Drawn Copper Wire. Suhu maksimum konduktor yang diijinkan adalah 250°C untuk tipe sambungan dengan baut. Untuk menghitung diameter penghantar yang akan digunakan persamaan (2.3) yaitu :

$$\begin{aligned}
 A_{mm^2} &= I \sqrt{\frac{\left[\frac{I_G \cdot \rho_T \cdot 10^4}{TCAP} \right]}{1n \left[1 + \left(\frac{I_m - I_G}{K_0 + T_G} \right) \right]}} \\
 (4.1) \\
 &= 31,3 \sqrt{\frac{\left[\frac{1,0 \times 0,00381 \times 1,7774 \times 10^4}{3,422} \right]}{1n \left[1 + \left(\frac{250 - 40}{242 + 40} \right) \right]}} \\
 &= \underline{187,8 \text{ mm}^2}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas, luas penampang konduktor yang didapat 187,8 mm², tetapi konduktor yang digunakan adalah 200 mm² dengan ukuran diameter $d = 0,0182$ m.

Ukuran diameter konduktor yang akan digunakan haruslah lebih besar dari hasil perhitungan yang didapat untuk mengantisipasi arus gangguan yang lebih besar. Hal ini dilakukan agar konduktor tidak mudah rusak karena bila konduktor rusak maka akan sangat sulit untuk memperbaiki atau menggantinya.

Lapisan permukaan tanah pada daerah yang ditanam elektroda tidak dilindungi dengan lapisan koral, sehingga nilai CS = 1. Resistans jenis permukaan tanah berbatu adalah 3000 Ω -m. Batas tegangan langkah yang aman bagi manusia dengan berat badan ≤ 50 kg dan ≤ 70 kg menurut persamaan (2.9) dan (2.10) adalah :

Batas tegangan R sentuh yang aman bagi manusia dengan berat badan ≤ 50 kg dan ≤ 70 kg menurut persamaan (2.12) dan (2.10) adalah :

$$\begin{aligned} E_{sentuh\ 50} &= (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ volt} \\ &= (1000 + 1,5 \cdot 1 \cdot 3000) \frac{0,116}{\sqrt{1}} \\ &= 636 \text{ volt} \end{aligned}$$

Atau,

$$\begin{aligned} E_{sentuh\ 70} &= (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ volt} \\ &= (1000 + 1,5 \cdot 1 \cdot 3000) \frac{0,157}{\sqrt{1}} \\ &= 863,5 \text{ volt} \end{aligned}$$

Luas daerah yang diliputi oleh elektroda pbumian 5850 m². dengan panjang 130 m dan lebar 45 m. Jumlah konduktor memanjang adalah 10 dan melebar sebanyak 27 buah, sehingga panjang keseluruhan konduktor adalah 3026 m. Panjang konduktor L' pada sisi yang lebih pendek adalah 45 m. Jumlah konduktor parallel n dalam kisi - kisi utama adalah 16 buah Sehingga jarak rata - rata antara konduktor - konduktor parallel pada jarring adalah :

$$\begin{aligned} D &= \frac{D}{n} = \frac{45m}{16} \\ &= \underline{3m} \end{aligned}$$

Perancangan pbumian ini hanya menggunakan konduktor mendatar saja, jadi tidak menggunakan konduktor tegak (elektroda batang). Sehingga resistans grid dapat dihitung dengan persamaan (2.14) adalah

$$\begin{aligned} R_g &= \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \\ &= 50 \left[\frac{1}{3025} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 5850}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0,75\sqrt{20/5850}} \right) \right] \\ &= \underline{0,30\Omega} \end{aligned}$$

Faktor pembagi arus (S_f) besarnya I dan I_f dari persamaan (2.19), sehingga arus grid dapat dihitung dengan persamaan (2.21), yaitu:

$$I_g = S_f \cdot I_f$$

$$\begin{aligned}
&= 1,0,6.31500 \\
&(4.5) \\
&= 18900 \text{ A} \\
&= 18,9 \text{ kA}
\end{aligned}$$

Karena pembumian yang ditanam tidak akan berkembang lagi pada masa yang akan datang, maka nilai factor koreksi arus gangguan (C_p) adalah 1. Dan factor pelemahan selama waktu gangguan (D_f) adalah 1. Sehingga besarnya arus grid maksimum sesuai persamaan (2.22), yaitu :

$$I_D = C_f \cdot D_f \cdot I_g$$

$$\begin{aligned}
&= 1 \cdot 1 \cdot 18900 \\
&= 18900 \text{ A} \\
&= 18,9 \text{ kA}
\end{aligned}$$

Kenaikan potensial bumi (GPR) sesuai persamaan (2.23), yaitu :

$$\begin{aligned}
GPR &= I_g \cdot R_g \\
(4.7) \\
&= 18900 \text{ A} \cdot 0,30 \Omega \\
&= 5670 \text{ V}
\end{aligned}$$

Karena kenaikan potensial bumi lebih tinggi (5670 V) dari tegangan sentuh yang diperbolehkan (638 V), maka sangatlah diperlukan untuk menghitung tegangan mesh dan tegangan langkah. Untuk menghitung tegangan mesh, konstanta K_m dan K_i haruslah dihitung terlebih dahulu.

Konstanta K_m dihitung dengan persamaan (2.25) dan K_i dengan persamaan (2.29), yaitu :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{3^2}{16 \cdot 0,75 \cdot 0,182} + \frac{(3+2 \cdot 0,75)^2}{8 \cdot 3 \cdot 0,0182} - \frac{0,75}{4 \cdot 0,0182} \right) + \frac{1}{1,32} \ln \frac{8}{\pi(2 \cdot 16 - 1)} \right] \\
&= 0,39
\end{aligned}$$

Dengan :

$$\begin{aligned}
n &= \sqrt{n_1 n_2} \\
&= \sqrt{10 \cdot 27} \\
&\approx 16
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{1 + \frac{0,75}{1}} \\
&= 1,32
\end{aligned}$$

Untuk menghitung besarnya factor koreksi geometri K_i digunakan persamaan (2.29), yaitu:

$$\begin{aligned}
K_i &= 0,656 + 0,172n \\
&= 0,656 + 0,172 \cdot 16 \\
&= 3,41
\end{aligned}$$

Dengan diketahui nilai K_m dan K_i , maka tegangan mesh dapat dihitung dengan persamaan (3.28), yaitu :

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L}$$

$$= \frac{50.0.39.3.41.18900}{3025}$$

$$= 415,5 \text{ V}$$

Tegangan mesh $E_m 415,5 \text{ V} < E_{\text{sentuh}} 638 \text{ V}$. Dengan tercapainya nilai tersebut, maka dapat dilanjutkan dengan menghitung tegangan langkah. Faktor ruang untuk tegangan langkah K_s dihitung dengan persamaan (3.32). Untuk kedalaman $0,25 < h < 2,5$ besarnya K_s adalah :

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

$$= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2.0,75} + \frac{1}{3+0,75} + \frac{1}{3} (1 - 0,5^{27-2}) \right]$$

$$= 0,40$$

Besarnya tegangan langkah sesuai dengan persamaan (3.31) adalah :

$$E_L = \frac{\rho K_s K_i I_G}{3025}$$

$$= \frac{50.0.40.3.41.18900}{3025}$$

$$= 426,1 \text{ V}$$

Sesuai dengan persyaratan bahwa $E_L 426,1 \text{ V} < E_{\text{langkah}} 2204 \text{ V}$, maka tidak perlu merubah parameter-parameter, dan perhitungannya sesuai dengan yang diinginkan. Dari hasil perhitungan diatas, maka dapat dibuat ringkasan dari beberapa parameter penting sebagai dasar keamanan sebuah gardu induk. Ringkasan perhitungan ditunjukkan pada table 3.2 :

Tabel 3.2 Ringkasan hasil perhitungan

Parameter	Hasil Perhitungan
Resistans jenis tanah (ρ)	50 Ω -m
Ukuran konduktor ($A \text{ mm}^2$)	200mm ²
Resistans grid (R_g)	0,30 Ω
Tegangan langkah	
a. $E_{\text{langkah}} 50$	2204 V
b. $E_{\text{langkah}} 70$	2983 V
c. E_L	426,1 V
Tegangan sentuh	
d. $E_{\text{sentuh}} 50$	638 V
e. $E_{\text{sentuh}} 70$	863,5 V
f. E_m	415, 5
GPR (Kenaikan Potensial Bumi)	V 5670 V

3.2. Pemeriksaan Faktor Keselamatan Pada Gardu Induk.

Untuk memeriksa panjang konduktor agar konduktor yang digunakan tidak terlalu pendek sehingga dapat memperbesar nilai resistans grid, maka dapat dilakukan perhitungan panjang konduktor minimal yang dibutuhkan dengan menggunakan persamaan (2.37) dan (2.35).

Untuk $E_m < E_{\text{sentuh } 50}$ adalah :

$$L > \frac{K_m \cdot K_i \cdot \rho \cdot I_G \cdot \sqrt{t_s}}{(116 + 0,174 \cdot C_s (h_s K) \rho_s)}$$

$$L > \frac{0,39,3,41,50,1,8900, \sqrt{1}}{(116 + 0,174 \cdot 1,3000)}$$

$$L > \underline{1970 \text{ m}}$$

Jadi panjang konduktor yang dibutuhkan haruslah melebihi 1970 m.

Untuk $E_m < E_{\text{sentuh } 70}$ adalah :

$$L > \frac{K_m \cdot K_i \cdot \rho \cdot I_G \cdot \sqrt{t_s}}{(157 + 0,235 \cdot C_s (h_s K) \rho_s)}$$

(4.14)

$$L > \frac{0,39,3,41,50,1,8900, \sqrt{1}}{(157 + 0,235 \cdot 1,3000)}$$

$$L > \underline{1458 \text{ m}}$$

Jadi panjang konduktor yang dibutuhkan haruslah melebihi 1458 m.

3.3. Menggunakan Lapisan Kerikil

Penggunaan lapisan batu kerikil biasanya setebal 8 – 20 cm, dengan menggunakan lapisan kerikil sebagai lapisan permukaan, maka nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah dapat dikurangi. Dengan menggunakan persamaan (2.4), maka nilai factor refleksi K adalah :

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

(4.15)

$$= \frac{50 - 3000}{50 + 3000}$$

$$= -0,9672$$

Sehingga nilai factor reduksi C_s dari gambar 3.3 untuk ketebalan kerikil h_s 10 cm adalah 0,55. Dengan diketahuinya $C_s = 0,55$, maka dapat dihitung batas tegangan langkah dan tegangan sentuh yang aman.

Batas tegangan langkah yang aman ≤ 50 kg dari persamaan (2.10), adalah :

$$E_{\text{langkah } 50} = (1000 + 6C_s (h_s, K) \rho_s) 0,116 / \sqrt{t_s}$$

$$= (1000 + 6,0,55,3000) 0,116 / \sqrt{t_s}$$

$$= 1264,4 \text{ V}$$

Batas tegangan langkah yang aman 70 kg dari persamaan (2.11), adalah :

$$E_{\text{langkah } 70} = (1000 + 6C_s (h_s, K) \rho_s) 0,157 / \sqrt{t_s}$$

$$= (1000 + 6,0,55,3000) 0,157 / \sqrt{t_s}$$

$$= 1711,3 \text{ V}$$

Batas tegangan sentuh yang aman 5 50 kg dari persamaan (2.13), adalah:

$$\begin{aligned} E_{langkah\ 50} &= (1000 + 1,5C_s(h_s,K)\rho_s)0,116/\sqrt{t_s} \\ &= (1000 + 1,5 \cdot 0,55 \cdot 3000)0,116/\sqrt{t_s} \\ &= 403,1\ V \end{aligned}$$

Batas tegangan langkah yang aman 50 kg dari persamaan (2.10), adalah :

$$\begin{aligned} E_{langkah\ 70} &= (1000 + 1,5C_s(h_s,K)\rho_s)0,157/\sqrt{t_s} \\ &= (1000 + 6,0 \cdot 55 \cdot 3000)0,157/\sqrt{t_s} \\ &= 545,6\ V \end{aligned}$$

Tabel 3.3 dibawah ini merupakan, dari hasil perhitungan tegangan langkah dan tegangan sentuh untuk membandingkan lapisan permukaan tanah tanpa kerikil dan lapisan permukaan tanah menggunakan kerikil.

Tabel 3.3 Perbandingan lapisan tanah tanpa kerikil dengan yang menggunakan kerikil

Permukaan tanpa kerikil	Permukaan dengan kerikil
langkah 50 = 20V	$E_{langkah\ 50} = 1264,4\ V$
98V	$E_{langkah\ 70} = 1711,3\ V$
$E_{sentuh} = 38\ V$	$E_{sentuh\ 50} = 403,1\ V$
$E_{sentuh\ 70} = 86V$	$E_{sentuh\ 70} = 545,6\ V$

Dari tabel 3.3 diatas dapat diketahui bahwa permukaan tanah dengan lapisan kerikil mempunyai nilai tegangan langkah dan tegangan sentuh yang lebih kecil dibandingkan permukaan tanah tanpa menggunakan lapisan kerikil. Nilai tersebut dapat menjadi lebih kecil lagi apabila lapisan kerikil dipertebal.

4. KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dengan menggunakan elektroda Pita dan menggunakan sistem jaring atau *gird* dapat memperoleh nilai resistan yang sudah menjadi acuan standar *ANSI / IEEE Std 80-2000* menyarankan $1\ \Omega$.
2. Penggunaan konduktor haruslah melebihi panjang konduktor minimum yang diperlukan untuk tujuan keselamatan manusia disekitar gardu induk. Panjang konduktor minimum dari hasil perhitungan adalah 3025 m dengan luas tanah 5850 m, panjang 130 m dan lebar 45 m. Dari panjang konduktor yang digunakan, dapat dilihat bahwa perencanaan sangatlah mengutamakan keselamatan.

3. Dengan menggunakan elektroda Pita dan menggunakan sistem jaring atau *grid* dapat memperoleh nilai resistansi yang sudah menjadi acuan standar *ANSI/IEEE Std 80-2000* menyarankan dibawah 1 Ω dan untuk PUIL 2000 ayat (442) menyarankan dibawah 5 Ω .
4. Penggunaan kerikil sebagai lapisan permukaan tanah sangat berguna untuk mengurangi besarnya tegangan sentuh dan tegangan langkah dibandingkan dengan permukaan tanah yang tidak dilapisi kerikil

DAFTAR PUSTAKA

- IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding ANSI/IEEE Std 80. 2000.
- Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 SNI-0225. 2000.
- Charles F. Dalziel, W. r. Lee Reevaluation of Lethal Electric Current IEEE Transactions on Industry and General Application, VoLIGA-4, No 5 Sep/Oct 1968.
- Pengamanan Terhadap Tegangan Sentuh Pada Instalasi Tegangan Rendah Jakarta 1975.
- Gupta B. Thapar. Januari 1992, " Impulse Impedance of Rectangular Grounding Grids ", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 7, No.1
- Wibowo Andri. 1997, " Studi Tentang Integrated Grounding Sistem Pentanahan pada Sistem Tenaga Listrik ", Skripsi, Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, Surabaya.
- Arismunandar Artono. 1997, " Teknik Tenaga Listrik ", PT. Pradnya Paramita, Jakarta.