

FAKTOR-FAKTOR PENYEBAB TERJADINYA PERUBAHAN TEGANGAN PERMUKAAN TANAH PADA PEMBUMIHAN SISTEM GRID-ROD DALAM STRUKTUR TANAH DUA LAPIS (SUATU ANALISA KASUS)

Tajuddin, Ahmad Gaffar, Bakhtiar¹⁾

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui faktor faktor yang menjadi penyebab turun/ rendahnya nilai tegangan permukaan tanah khususnya tegangan sentuh sentuh yang timbul saat terjadi gangguan, Besarnya tegangan sentuh dipengaruhi banyak factor sehingga dalam merencanakan sistem pembumihan perlu diketahui faktor yang dominan berpengaruh terhadap tegangan sentuh tersebut. Data-data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh pada P.T PLN khususnya PIKITRING SULMAPA antara lain nilai tahanan jenis tanah, ketebalan lapisan tanah bagian pertama, tegangan kerja sistem yang direncanakan. Kegiatan ini diawali dengan menghitung: Luas Daerah Pembumihan, Ukuran Minimum Elektroda Pembumihan, Jumlah Minimum Batang Konduktor serta seluruh panjang batang pembumihan yang diperlukan untuk selanjutnya hasilnya digunakan menghitung Tegangan Sentuh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor faktor yang dominan berpengaruh terhadap rendahnya atau turunnya tegangan sentuh secara berturut turut adalah sbb: i). Perubahan jarak antara konduktor paralel (D). Semakin kecil jarak konduktor paralel maka semakin panjang elektroda grid yang dibutuhkan. Dengan semakin kecilnya nilai tahanan dari konduktor yang paralel tersebut berarti semakin memudahkan jalan arus gangguan ke tanah sehingga tegangan pada permukaan tanah menjadi semakin kecil. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa setiap penambahan 1 meter jarak konduktor paralel (dari 3 meter sampai dengan 12 meter) menyebabkan terjadinya perubahan rata-rata tegangan sentuh sebesar 11,36 %. Untuk $\rho_1 = 30,4 (\Omega.m)$ dan $\rho_2 = 11,3 \Omega.m$ ii), Perbandingan tahanan jenis tanah lapisan pertama dan lapisan kedua. Dan iii) kedalaman penanaman elektroda grid. Hasil yang diperoleh, menunjukkan bahwa semakin dalam elektroda tersebut tertanam dalam tanah (dari 0,5 meter sampai dengan kedalaman 1,0 meter) tegangan sentuh semakin kecil. Namun bila kedalaman penanaman elektroda ditambah terus melebihi 1,0 meter ternyata tegangan sentuh menjadi semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian dalam IEEE, bahwa penanaman elektroda grid akan efektif menurunkan tegangan sentuh hanya sampai pada kedalaman 1,0 meter.

Kata Kunci: faktor dominan, tegangan sentuh, tanah dua Lapis.

¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang

I. PENDAHULUAN

Pada setiap perencanaan pembumian gardu induk yang selalu menjadi perhatian adalah besarnya tegangan permukaan khususnya tegangan sentuh. Gardu induk merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik dimana di dalamnya terdapat beberapa peralatan penting yang akan menunjang kontinuitas penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Peralatan-peralatan yang terdapat dalam suatu gardu induk antara lain trafo tenaga, pemutus tenaga, trafo pengukuran, arrester, pemisah dan lain-lain. Peralatan-peralatan dalam gardu induk tersebut harus mendapatkan perlindungan yang baik agar terhindar dari kerusakan akibat mengalirnya arus gangguan.

Lokasi gardu induk umumnya berada pada daerah-daerah yang kemungkinannya mempunyai struktur tanah yang berlapis-lapis. Selain itu ada beberapa parameter yang turut mempengaruhi nilai tahanan pembumian.

Sehubungan dengan hal ini, maka yang dianggap penting untuk diteliti adalah parameter mana yang memberikan pengaruh yang besar/dominan terhadap nilai tegangan sentuh dengan menggunakan sistem grid-rod dalam struktur tanah non homogen (dua lapis). Struktur tanah dua lapis artinya bahwa elektroda pembumian harus ditanam pada kedalaman tertentu sampai menembus tanah yang memiliki struktur yang berbeda dengan jenis tanah bagian atasnya (struktur /jenis tanahnya sudah berubah).

Dalam menentukan tegangan sentuh tersebut akan dianalisis beberapa parameter yang berpengaruh terhadap tegangan sentuh itu sendiri antara lain i). tahanan jenis tanah lapisan pertama dan lapisan kedua, ii). panjang elektroda grid/ jarak konduktor grid dan Kedalaman penanaman elektroda.

J.M Nahman dan V.B Djorjevic (1996) berpendapat bahwa tahanan elektroda pembumian adalah salah satu parameter penting yang dapat menentukan kenaikan potensial pada peralatan yang terbuat dari logam. Hal ini sangat bergantung pada keadaan tanah tempat peralatan itu berada, tahanan pembumian dan grid yang ditanam pada kedalaman tertentu tergantung pada lapisan tanah tempat grid itu ditanam. Selain itu dengan sejumlah konduktor dalam grid akan menyebabkan potensial permukaan tanah semakin kecil dan terdistribusi dengan baik.

Elektroda Pembumian

Elektroda pembumian adalah penghantar yang ditanam dalam tanah dan membuat kontak langsung dengan tanah. Adanya kontak langsung itu dimaksudkan agar diperoleh jalan arus yang sebaik-sebaiknya apabila terjadi gangguan sehingga arus tersebut disalurkan ke tanah.

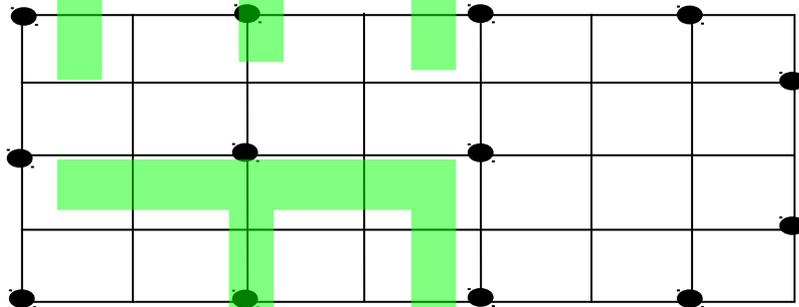
Tahanan tanah disekitar elektroda tergantung pada tahanan jenis tanah. Pada sistem pembumian terdapat beberapa komponen tanah yang berpengaruh terhadap besar tahanan pembumian yaitu.

Susunan dari dua batang elektroda berbentuk selinder dengan panjang L yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah dengan jarak antara kedua elektroda tersebut sebesar S terlihat pada gambar di bawah ini. Bilamana nilai tahanan pembumian dan tahanan jenis tanah yang relatif tinggi, maka untuk menguranginya yaitu dengan cara menanamkan batang-batang elektroda pembumian dalam jumlah yang cukup banyak.

Sistem grid-rod

Sistem grid-rod merupakan kombinasi antara sistem pembumian konduktor berbentuk kisi-kisi (grid), yang horizontal dengan permukaan tanah dan dibantu dengan batang-batang elektroda vertikal (rod) yang dihubungkan untuk menembus permukaan tanah. lapisan bawah. Sistem penanaman elektroda grid-rod ini dipilih karena sistem gabungan ini dianggap cukup efektif untuk meratakan tegangan dipermukaan tanah saat terjadi gangguan tanah serta menghasilkan tahanan pentanahan yang rendah.

Y.L Chow, M.M Elsherbiny dan M.M.A Salama (1996) mengatakan bahwa pada struktur tanah dua lapisan, hal yang penting adalah ketelitian hasil perhitungan tahanan pembumian. Dalam pentanahan sistem gabungan grid-rod nilai tahanan pembumian dipengaruhi oleh jumlah elektroda batang (rod) yang dihubungkan dengan grid. Pada penelitian selanjutnya (1997) dengan sistem gabungan grid-rod ini mereka berkesimpulan bahwa hal yang penting dalam pembumian gardu induk adalah masalah keselamatan, keandalan dan operasi sistem tenaga listrik. Kombinasi sistem pembumian yang biasa dilakukan adalah dengan menggunakan konduktor grid yang horizontal dengan permukaan tanah yang dibantu dengan batang-batang vertikal. Hal ini sangat efektif jika batang-batang (rod) dihubungkan (menembus) permukaan tanah lapisan bawah. Bentuk elektroda pembumian gabungan grid-rod seperti gambar dibawah.



Gambar 1. Pembumian gabungan grid-rod

- a. Panjang elektroda pembumian
Kebutuhan akan konduktor pembumian biasanya dapat diperkirakan setelah diketahui tata letak peralatan yang akan dibumikan serta sistem pembumian yang akan digunakan. Sebagai dasar pertimbangan dalam penentuan panjang konduktor

pembumian umumnya digunakan tegangan sentuh bukan tegangan langkah dan tegangan pindah. Hal ini disebabkan karena tegangan langkah yang timbul dalam instalasi yang terpasang pada lokasi lebih kecil dari pada tegangan sentuh tersebut. Pembumian pada peralatan gardu induk ini dilakukan dengan sistem grid-rod, yaitu dengan menanamkan konduktor secara horizontal dengan bentuk kisi-kisi (grid) dan menanamkan elektroda secara vertikal dengan permukaan tanah (rod).

b. Jumlah batang konduktor pembumian

Pada saat arus gangguan mengalir antara batang pembumian dengan tanah maka tanah akan menjadi panas akibat $i^2 \rho$. Suhu tanah harus tetap dibawah 100 °C untuk menjaga jangan sampai terjadi penguapan air kandungan dalam tanah dan kenaikan tahanan jenis tanah. Seluruh panjang batang pembumian yang diperlukan dihitung dari pembagian arus gangguan ke tanah dengan kerapatan arus yang diizinkan. Kerapatan arus yang diizinkan pada permukaan batang pembumian dapat dihitung dengan persamaan:

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} d \sqrt{\frac{\delta \cdot \theta}{\rho t}} \dots\dots\dots 1$$

Dimana:

- i : kerapatan arus yang diizinkan (ampere/cm)
- d : diameter batang pembumian (mm)
- δ : panas spesifik rata-rata tanah (±1.75x10⁶watt-detik tiap m³ tiap °C)
- θ : kenaikan suhu tanah yang diizinkan (°C)
- ρ : tahanan jenis tanah (Ohm-meter)
- t: Lama waktu gangguan = 0,75 detik

Sedangkan jumlah minimum batang pembumian yang diperlukan dan pembagian panjang total dengan panjang suatu batang, atau bentuk lain dituliskan sebagai berikut:

$$N_{\min} = \frac{I_g}{L_{bi} \cdot i} \dots\dots\dots 2$$

Dimana:

- N_{min} : jumlah minimum batang pentanahan yang diperlukan
- I_g : arus gangguan ke tanah (Ampere)
- i : kerapatan arus yang diizinkan (Ampere/cm)
- L_{bi} : kedalaman penanaman rod (3.5meter)

Tahanan Jenis Tanah

Persamaan-persamaan untuk tahanan tanah dari berbagai system elektroda cukup rumit, dan dalam beberapa hal dapat dinyatakan dalam pendekatan pendekatan. Semua pernyataan dalam persamaan-persamaan itu diperoleh dari hubungan $R = \rho \frac{L}{A}$ dengan asumsi bahwa tahanan tanah seragam pada seluruh volume tanah, kendati hal ini tidak mungkin dan sangat jarang ada.

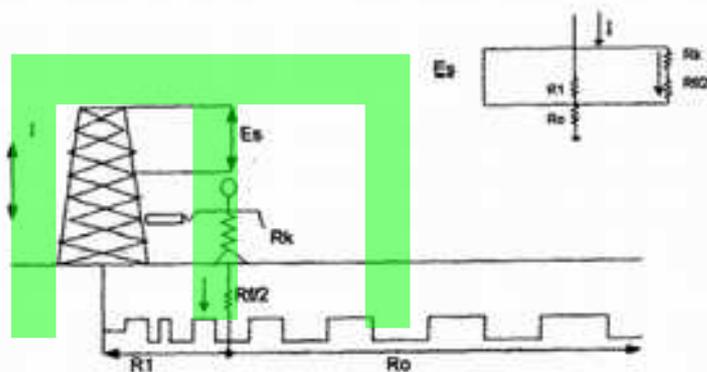
161 Tadjuddin, Ahmad Gaffar, Bakhtiar, Faktor-Faktor Penyebab Terjadinya Perubahan Tegangan Permukaan Tanah pada Pembumian Sistem Grid-Rod dalam Struktur Tanah Dua Lapis (Suatu Analisa Kasus)

T.S Hutaauruk mengatakan bahwa tahanan jenis tanah harganya bermacam-macam, tergantung pada komposisi tanah. Untuk tanah berlapis-lapis, tahanannya berbeda-beda sesuai dengan komposisi tanah yang membentuk lapisan tersebut.

Gradien Tegangan pada Permukaan Tanah

Pada umumnya sebagai pengamanan dianggap bahwa gradien tegangan antara titik sentuh pada peralatan dengan titik pada permukaan tanah tempat berdiri, atau gradien tegangan pada permukaan tanah yang bersentuhan dengan kedua kaki yang menimbulkan bahaya bagi seseorang. Secara umum gradien yang timbul selama mengalir arus gangguan tanah dapat dikelompokkan menjadi tegangan sentuh, tegangan langkah dan tegangan pindah. Untuk penelitian kali ini difokuskan hanya melakukan perbandingan tegangan sentuh saja.

Tegangan sentuh merupakan salah satu dari tegangan permukaan. Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat di antara suatu objek yang disentuh dari suatu titik yang berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan kisi-kisi pembumian yang berada dibawahnya. Besar arus gangguan dibatasi oleh tahanan orang dan tahanan kontak ke tanah dari kaki orang tersebut seperti ditunjukkan oleh gambar 2.



Gambar 2. Tegangan Sentuh dengan Rangkaian Pengganti

Dari rangkaian pengganti dapat dilihat hubungan sebagai berikut:

$$E_s = \left(R_k + \frac{R_f}{2} \right) I_k \quad \dots\dots\dots 3$$

Dimana:

- Es : tegangan sentuh (volt)
- Rk : tahanan badan orang (1000 ohm)
- Rf : tahanan kontak ke tanah dari satu kaki pada tanah yang diberi lapisan Koran 10 cm (3000 ohm)
- Ik : besarnya arus yang melalui badan (A)

Tabel 1. Besar tegangan sentuh yang diizinkan dan lama gangguan

Lama gangguan t (detik)	Tegangan sentuh yang diizinkan (volt)
0,1	1.0980
0,2	1.400
0,3	1.140
0,4	990
0,5	890
1,0	626
2,0	443
03,0	362

Tegangan sentuh pada struktur tanah non homogen (dua lapis) dihitung dengan persamaan (4)

$$E_m = C_m K_m K_i \rho_1 \frac{I_g}{L}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{\sqrt{1+h}} \cdot \text{Ln} \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \dots\dots\dots 4$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}}$$

n adalah jumlah konduktor pembumian masing - masing sisi;

$$n = \sqrt{n_{\text{hor}} \cdot n_{\text{vert}}}$$

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

$$C_m = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x$$

$$x = 0,33 \text{Log}_{10} 10H \quad \text{bila } \rho_2 < \rho_1$$

$$x = 0,16 \text{Log}_{10} (\sqrt{A} \cdot H) - 0,1 \quad \text{bila } \rho_2 > \rho_1$$

Dimana:

K_i : faktor koreksi ketidakrataan kerapatan arus

D : jarak antara konduktor paralel (m)

h : kedalaman penanaman konduktor kisi-kisi

n : jumlah konduktor paralel pada kisi-kisi

d : diameter konduktor kisi-kisi (m)

ρ : tahanan jenis tanah (ohm-meter)

I : besar arus gangguan tanah (A)

L : panjang seluruh konduktor pembumian termasuk elektroda batang (m)

L = L_g + L_r (Untuk sistem pembumian gabungan grid rod)

163 Tadjuddin, Ahmad Gaffar, Bakhtiar, Faktor-Faktor Penyebab Terjadinya Perubahan Tegangan Permukaan Tanah pada Pembedaan Sistem Grid-Rod dalam Struktur Tanah Dua Lapis (Suatu Analisa Kasus)

Lg : total panjang penghantar grid

Lr : total panjang penghantar rod

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan pencarian data data yang diperlukan kaitannya dengan sistem pembedaan Gardu Induk antara lain:

- Ukuran daerah pentanahan untuk menghitung luas daerah pentanahan
- Tahanan jenis tanah tiap lapisan
- Tegangan kerja sistem yang direncanakan

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data hasil pengukuran yang dilakukan oleh PT. PLN (persero) khususnya PIKITRING SULMAPA.

Secara umum pada penelitian ini dalam menghitung besarnya tegangan sentuh dalam struktur tananah dua lapis diasumsikan nilainya bervariasi. Perhitungan diawali dengan menghitung Luas Daerah Pembedaan, Ukuran Minimum Elektroda Pembedaan, Jumlah Minimum Batang Konduktor serta seluruh panjang batang pembedaan yang diperlukan untuk selanjutnya digunakan menghitung Tegangan Sentuh yang diizinkan. Pada penelitian ini metode analisis datanya menggunakan metode kuantitatif dengan regresi sederhana menggunakan program Excel.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang telah dilakukan oleh oleh J.M Nahman dan V.B Djorjevic (1996) mengatakan bahwa tahanan elektroda pembedaan adalah salah satu parameter penting yang dapat menentukan kenaikan potensial pada peralatan yang terbuat dari metal. Hal ini sangat bergantung pada keadaan tanah tempat peralatan itu berada. Selanjutnya dalam makalahnya beliau mengatakan bahwa tahanan pembedaan dari grid yang ditanam pada kedalaman tertentu tergantung pada lapisan tanah tempat grid itu ditanam. Khusus untuk tanah uniform (homogen), bila kedalaman grid bertambah maka tahanan pembedaan menjadi berkurang. Selain itu dengan jumlah konduktor dalam grid akan menyebabkan potensial permukaan tanah semakin kecil dan terdistribusi dengan baik. Hal yang sangat penting diperhatikan adalah ketelitian perhitungan tahanan pembedaan dengan mengasumsikan bahwa tanah itu terdiri atas dua lapisan yang harus diketahui tahanan jenisnya serta ketebalan lapisan tanah bagian pertama.

a. Luas Daerah Pembedaan

Luas daerah pembedaan gardu induk Sungguminasa Baru dihitung dengan menggunakan data-data ukuran daerah pembedaan itu sendiri. Lokasi tempat pembangunan gardu induk Sungguminasa mempunyai ukuran sebagai berikut:

Panjang P = 160 meter dan Lebar L = 61 meter

luasnya adalah hasil kali antara panjang dengan lebar yaitu: $160 \times 61 \text{ m}^2$.

Jadi luas daerah pembedaan gardu induk tersebut adalah 9760 m^2 .

b. Tahanan Jenis Tanah

Data hasil pengukuran tahanan jenis tanah oleh PT PLN PIKITRING SULMAPA adalah sebagai berikut:

Tanah lapisan pertama merupakan tanah timbunan (urugan) dengan tahanan jenis ρ_1 senilai 30,4 ohm meter dengan ketebalan lapisan tanah bagian pertama adalah $H = 2,75$ meter. Untuk tanah lapisan kedua tergolong jenis tanah liat berpasir dengan tahanan jenis ρ_2 sebesar 11,3 ohm meter. Tahanan jenis tanah bagian permukaan (Crushed rock) adalah $\rho_s = 3000$ ohm.m dengan ketebalan $h_s = 0,10$ m.

c. Ukuran Minimum Elektroda Pembumian

Suhu maksimum konduktor yang diizinkan sesuai dengan IEC adalah sebesar $T_m = 500$ ° C dan suhu sekeliling tahanan maksimum $T_a = 40$ ° C, maka ukuran minimum konduktor pembumian dapat dihitung dengan menggunakan diameter

persamaan (5) yaitu

$$A = I_g \sqrt{\frac{33t}{\text{Log}_{10} \left(\frac{T_m - T_a}{T_m + T_a} \right) + 1}}$$

Dari perencanaan yang dilakukan oleh PT.PLN PIKITRING SULMAPA, bahwa tegangan kerja gardu induk adalah 150 kV, sedangkan waktu gangguan maksimum direncanakan sebesar $t = 1$ detik, sehingga besarnya arus gangguan ke tanah adalah sebesar $I_g = 24,75$ kA.

Dengan memasukkan nilai nilai di atas diperoleh :

$$A = 24,75 \times 10^3 \sqrt{\frac{33}{\text{Log}_{10} \left(\frac{500 - 40}{234 + 40} \right) + 1}}$$

$A = 202542,1637$ Circular mil

$A = 102,58761$ mm² .

Atau diameter minimum konduktor/elektroda pembumian $d = 0,0114$ meter. Dalam perencanaan ini digunakan konduktor kisi-kisi dengan diameter sebesar $d = 0,0150$ meter.

d. Jumlah Minimum Batang Konduktor

Seluruh panjang batang pembumian yang diperlukan dihitung dari pembagian arus gangguan ke tanah dengan kerapatan arus yang diizinkan. Kerapatan arus yang diizinkan pada permukaan batang pembumian dapat dihitung dengan persamaan

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

d : diameter konduktor = 15 mm

165 Tadjuddin, Ahmad Gaffar, Bakhtiar, Faktor-Faktor Penyebab Terjadinya Perubahan Tegangan Permukaan Tanah pada Pembumian Sistem Grid-Rod dalam Struktur Tanah Dua Lapis (Suatu Analisa Kasus)

δ : panas specific rata-rata tanah = $1,75 \times 10^6$ Watt .detik per m^2 tiap $^{\circ}C$.

θ : kenaikan suhu tanah yang diizinkan = $50^{\circ}C$.

ρ : tahanan jenis tanah rata-rata dua lapis = 20,85 ohm.m

t : lama waktu gangguan = 1 detik

Dengan menggunakan data-data di atas diperoleh

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} \times 15 \sqrt{\frac{1,75 \times 10^6 \times 50}{20,85}}$$

$$i = 0,967 \text{ A/cm}$$

Jadi kerapatan arus yang diizinkan adalah 0,0967 A/cm.

Langkah selanjutnya adalah menentukan panjang batang pembumian.

Dalam analisis ini digunakan batang elektroda pembumian (rod) masing-masing 3,5 meter, maka jumlah batang minimum yang dibutuhkan dihitung berdasarkan persamaan:

$$N_{\min} = \frac{I_g}{L_{bi} \times i}, \text{ sehingga diperoleh } N_{\min} = \frac{24,75 \times 10^3}{3,5 \times 100 \times 0,0967}$$

$$N_{\min} = 73,0938 \approx 74 \text{ batang}$$

Panjang seluruh batang pembumian (rod), $L_r = 74 \times 3,5 \text{ m} = 259 \text{ meter}$.

e. Tegangan Sentuh yang diizinkan

Tegangan sentuh yang diizinkan dihitung dengan persamaan :

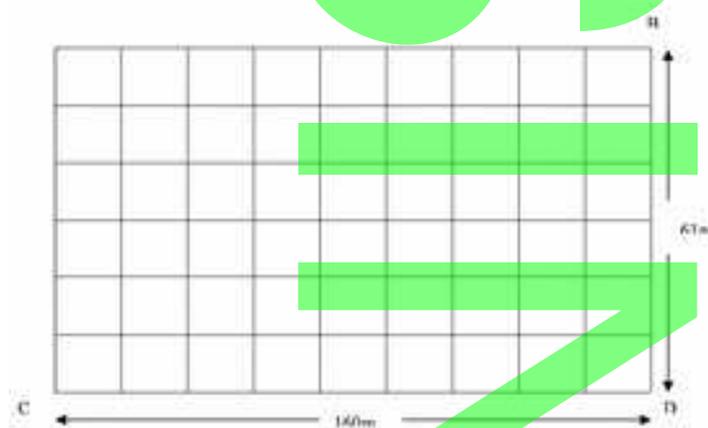
$$E_m = (1000 + 1,5 C_s \rho_s) \times \left(\frac{0,116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$C_s = 1 - 0,106 \left[\frac{1 - \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}{2h_s + 0,106} \right]$$

Berdasarkan IEEE standar 80 halaman 74 bahwa $\rho_s = 3000 \text{ Ohm.m}$ dan ketebalan maksimum $h_s = 0,10 \text{ m}$ maka diperoleh $C_s = 0,66$. Sehingga dengan demikian tegangan sentuh yang diizinkan adalah sebesar $E_m = 461 \text{ volt}$.

f. Panjang Elektroda Pembumian (Grid)

Ditetapkan suatu persyaratan bahwa tegangan sentuh yang diizinkan harus lebih besar dari tegangan sentuh yang terjadi. Dari syarat ini maka sebagai perhitungan awal digunakan jarak antara konduktor Paralel (kisi-kisi) sebesar $D = 3 \text{ meter}$. Dengan asumsi ini maka sistem pembumian yang direncanakan seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Konfigurasi Sistem Grid yang direncanakan

Jumlah konduktor paralel yang dibutuhkan dihitung dengan persamaan:

$$n_x = \frac{L_x}{D} + 1 \quad \text{dan} \quad n_y = \frac{L_y}{D} + 1$$

Dimana x dan y menunjukkan arah pemasangan elektroda grid berdasarkan sisi panjang dan pendek (x sisi panjang / sisi horizontal dan y sisi pendek / vertikal). Untuk jarak antara konduktor paralel $D = 3$ meter maka berdasarkan gambar 3. diperoleh jumlah konduktor paralel sebagai berikut:

$$n_{AB} = n_x = \frac{160}{3} + 1 = 55 \text{ batang}$$

$$n_{AC} = n_{xy} = \frac{61}{3} + 1 = 22 \text{ batang}$$

$$n_{AB} = n_x = 55 \times 61 \text{ m} = 3355 \text{ meter}$$

$$n_{AC} = n_{xy} = 22 \times 160 \text{ m} = 3520 \text{ meter}$$

Panjang total konduktor grid adalah $L_g = 6875$ meter.

g. Pengaruh perubahan jarak konduktor paralel (D) terhadap tegangan sentuh, $E_m = f(D)$

Dari hasil perhitungan pada butir f di atas dengan asumsi jarak antara konduktor paralel D yang bervariasi (di ubah) maka akan diperoleh panjang total konduktor pembumian yang juga bervariasi. Perubahan panjang konduktor total ini mempengaruhi besarnya tegangan sentuh seperti pada tabel berikut:

Tabel 2. Perhitungan Tegangan sentuh dengan variasi Jarak konduktor paralel (D) $E_m = f(D)$; $h = 0.8 \text{ m}$; $H = 2.75 \text{ m}$; $d = 0.015 \text{ m}$; $\rho_1 = 30,4 \Omega.m$; $\rho_2 = 11,4\Omega.m$

D (m)	Lr (m)	Lg (m)	L (m)	n	Em (volt)
3	298	6728	7026	34	181,85
4	298	5101	5399	26	230,56
5	298	4125	4423	21	272,69
6	298	3474	3772	18	309,76
7	298	3010	3308	15	342,09
8	298	2661	2959	13	372,92
9	298	2390	2688	12	400,44
10	298	2173	2471	11	425,87
11	298	1996	2294	10	449,54
12	298	1848	2146	9	471,72

Dari tabel 2 terlihat bahwa perubahan jarak konduktor paralel sangat berpengaruh terhadap besarnya tegangan sentuh yang timbul saat terjadi pengaliran arus gangguan ke tanah. Semakin kecil jarak antara konduktor paralel maka semakin panjang elektroda grid yang dibutuhkan. Konduktor kisi-kisi yang terpasang paralel dibawah permukaan tanah pada dasarnya berfungsi sebagai jalan arus gangguan ke tanah. pada dasarnya berfungsi sebagai jalan arus gangguan ke tanah. pada dasarnya berfungsi sebagai jalan arus gangguan ke tanah, Bila ditinjau dari sisi rangkaian listrik bahwa semakin banyak tahanan yang diparalel maka nilai tahanan totalnya menjadi semakin kecil. Dengan semakin kecilnya tahanan konduktor tersebut berarti semakin memudahkan jalan arus gangguan ke tanah yang berarti juga bahwa semakin cepat arus itu mengalir yang menyebabkan tegangan pada permukaan tanah menjadi semakin kecil.

Atau dengan kata lain semakin besar jarak konduktor paralel semakin besar nilai tegangan sentuh bila terjadi pengaliran arus gangguan ke tanah. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa setiap penambahan 1 meter jarak konduktor paralel (dari 3 meter sampai dengan 12 meter) menyebabkan terjadinya kenaikan rata-rata tegangan sentuh sebesar 11,36 %.

Selanjutnya berdasarkan tabel 3. dengan perubahan jarak konduktor paralel yang sama tetapi dengan kenaikan tahanan jenis tanah lapisan pertama sebesar 5 kali dari sebelumnya, ternyata tegangan sentuh yang timbul mengalami kenaikan rata-rata sebesar 2,3 kali lebih besar daripada tegangan sentuh pada saat tahanan jenis tanah sebelumnya ($\rho_1 = 30,4 \Omega.m$ menjadi $\rho_1 = 152 \Omega.m$). Ini berarti bahwa tanah dengan tahanan yang tinggi akan menyebabkan arus lambat mengalir ke dalam tanah sehingga potensial pada permukaan tanah menjadi lebih tinggi.

Tabel 3. Perhitungan Tegangan sentuh untuk variasi Jarak konduktor parallel (D) dan tahanan jenis tanah lapisan pertama $E_m = f(D)$; $h = 0.8 \text{ m}$; $H = 2.75 \text{ m}$; $d = 0.015 \text{ m}$; $\rho_2 = 11,4\Omega.m$

D (m)	L (m)	N	Em (volt)	
			$\rho_1 = 30,4 \Omega.m$	$\rho_1 = 152 \Omega.m$
3	7026	34	181,85	423,33
4	5399	26	230,56	536,74
5	4423	21	272,69	634,81
6	3772	18	309,76	721,10
7	3308	15	342,09	798,24
8	2959	13	372,92	868,15
9	2688	12	400,44	932,20
10	2471	11	425,87	991,40
11	2294	10	449,54	1052,12
12	2146	9	471,72	1061,39

h. Pengaruh perubahan kedalaman penanaman elektroda grid (h) terhadap tegangan sentuh, $E_m = f(h)$

Tabel 4 Perhitungan Tegangan sentuh dengan variasi Kedalaman penanaman elektroda grid, h $E_m = f(h)$; $D = 5 \text{ m}$; $d = 0.015 \text{ m}$; $\rho_2 = 11,3 \Omega.m$, $H = 2,75$

h (m)	Tegangan Sentuh (Volt)	
	$\rho_1 = 30,4 (\Omega.m)$	$\rho_1 = 152 (\Omega.m)$
0,5	285,02	664,64
0,6	279,58	650,86
0,7	275,48	641,31
0,8	272,69	634,80
0,9	270,90	630,60
1,0	269,88	628,30
1,5	272,16	633,58
1,75	276,10	642,74
2,0	281,07	654,33

Dari tabel 4. untuk $\rho_1 = 30,4 (\Omega.m)$ dan $\rho_2 = 11,3 \Omega.m$ menunjukkan bahwa semakin dalam elektroda tersebut tertanam dalam tanah dari 0,5 meter sampai dengan kedalaman 1,0 meter ternyata tegangan sentuh yang timbul pada permukaan tanah semakin kecil. Namun bila kedalaman penanaman elektroda ditambah terus melebihi 1,0 meter ternyata tegangan sentuh menjadi semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian dalam IEEE, bahwa penanaman elektroda grid akan efektif menurunkan tegangan sentuh hanya sampai pada kedalaman 1,0 meter. Selanjutnya bila tahanan jenis tanah lapisan pertama dinaikkan 5 kali dari sebelumnya juga memperlihatkan karakteristik tegangan sentuh yang sama dengan kenaikan rata-rata sebesar 3 kali. Setelah kedalaman penanaman elektroda melebihi 1,0 meter ter nyata tegangan sentuh mengalami kenaikan yang cukup signifikan. Ini berarti bahwa dengan semakin dalamnya elektroda sebagai jalan arus gangguan, menyebabkan arus

169 Tadjuddin, Ahmad Gaffar, Bakhtiar, Faktor-Faktor Penyebab Terjadinya Perubahan Tegangan Permukaan Tanah pada Pembumian Sistem Grid-Rod dalam Struktur Tanah Dua Lapis (Suatu Analisa Kasus)

gangguan tersebut lebih dahulu mengalir sepanjang permukaan tanah dibanding dengan mengalir pada elektroda. Akibat mengalirnya arus pada tanah dengan tahanan tertentu menyebabkan timbulnya beda potensial pada permukaan tanah tersebut.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis di atas, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a. Perubahan jarak antara konduktor paralel sangat berpengaruh terhadap besarnya tegangan sentuh. Semakin kecil jarak konduktor paralel maka semakin panjang elektroda grid yang dibutuhkan. Dengan semakin kecilnya tahanan dari konduktor yang paralel tersebut berarti semakin memudahkan jalan arus gangguan ke tanah sehingga tegangan pada permukaan tanah menjadi semakin kecil. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa setiap penambahan 1 meter jarak konduktor paralel (dari 3 meter sampai dengan 12 meter) menyebabkan terjadinya kenaikan rata-rata tegangan sentuh sebesar 11,36 %.
- b. Untuk $\rho_1 = 30,4 (\Omega.m)$ dan $\rho_2 = 11,3 \Omega.m$ menunjukkan bahwa semakin dalam elektroda tersebut tertanam dalam tanah (dari 0,5 meter sampai dengan kedalaman 1,0 meter) tegangan sentuh semakin kecil. Namun bila kedalaman penanaman elektroda ditambah terus melebihi 1,0 meter ternyata tegangan sentuh menjadi semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian dalam IEEE, bahwa penanaman elektroda grid akan efektif menurunkan tegangan sentuh hanya sampai pada kedalaman 1,0 meter.

V. DAFTAR PUSTAKA

Baldev Thapar, Victor Gerez. 1996. "Equivalent Resistivity of Non-uniform Soil For Grounding Grid Design", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.10 No. 2, pp. 759-767

IEEE Std. 142. 1982. "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial", Power System Technologies Committee of The IEEE Industry Application Society.

Lawrence & Pierce. 1995. "Earthing-Lightning Protection",

M.M.A Salama, M.M Elsherbiny dan Y.L Chow. 1995. "A Formula For Resistance of Substation Grounding In Two Layer Soil" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.10 No. 3, pp.1255 – 1262

Product Catalog, W.J Furse & Company Limited.

PUIL 2000. Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000. Badan Standarisasi Nasional.

T.S Hutaeruk. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan, Penerbit Erlangga, Jakarta.