

SISTEM PENTANAHAN BERDASARKAN PERBEDAAN LAPISAN TANAH UNTUK DI APLIKASIKAN PADA GARDU INDUK

Benny Oktrialdi¹⁾, Partaonan Harahap²⁾

Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UMSU
Jl. Kapten Muchtar Basri, BA No. 03 Medan Telp. (061) 6622400
bennyoktrialdi@umsu.ac.id; partaonanharahap@umsu.ac.id

Abstrak

Sistem Grid pada pentanahan (Grounding Grid) merupakan bagian terpenting dari sistem perancangan suatu gardu induk. Hal ini disebabkan karena pentanahan sangat berguna untuk melindungi semua perangkat jaringan listrik yang ada di gardu induk. Perancangan grid pada pentanahan Gardu Induk umumnya dirancang menggunakan standar IEEE 80-2013, dan diukur dengan menggunakan metode Wenner 4 kutub. Perancangan grid pada pentanahan Gardu Induk tentu dipengaruhi oleh lapisan-lapisan yg terdapat pada tanah, dimana setiap lapisan dari tanah ini tentulah berbeda antara 1 lapisan tanah dengan 2 lapisan tanah dan lapisan berikutnya, baik dari sisi Jenis tanahnya dan Resistivitasnya. Perbedaan antara lapisan ini dapat dilihat melalui perbedaan Resistivitas ketika melalui suatu pengukuran yang ada pada tanah dengan menggunakan Earth Tester. Grid yang dirancang oleh penulis berbentuk Persegi Panjang dengan ukuran 180x100m dengan Model Bujur sangkar, Model L, Model T, Model Tambah dan Model Segitiga. Dari percobaan yang dilakukan oleh penulis, diperoleh nilai tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat badan 50 Kg yaitu sebesar 1398.647 V < 1403,5 V. Dan untuk berat badan 70 Kg yaitu sebesar 1892,9V < 1899.5 V. Besarnya tegangan langkah yang sebenarnya adalah lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan, dan untuk berat badan 50 Kg, maka tegangan langkahnya adalah 5006,359 V < 5025.6 V. Dan untuk berat badan 70 Kg, besarnya tegangan langkah sebesar 6775,84 V < 6801.9 V dan besarnya tahanan pentanahan dari hasil percobaan adalah sebesar 0.131 Ohm sesuai dengan rekomendasi IEEE yaitu lebih kecil dari pada 1 Ohm untuk 2 lapisan tanah dengan kedalaman konduktor 1,8 m

Kata Kunci : *Grid pada Pentanahan, Lapisan Tanah, Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah.*

I. PENDAHULUAN

Sistem Grid pada pentanahan (*Grounding Grid*) merupakan bagian terpenting dari sistem perancangan suatu gardu induk. Hal ini disebabkan karena pentanahan sangat berguna untuk melindungi semua perangkat jaringan listrik di gardu induk. Pentanahan berfungsi untuk memberikan jalur tegangan yang berasal dari petir agar dapat menuju permukaan bumi, sehingga sistem jaringan listrik tidak mengalami kerusakan. Pada umumnya, jaringan pentanahan dapat dirancang dengan menggunakan metode perhitungan empiris. Metode perhitungan empiris sangat berguna untuk perhitungan efisiensi yang tinggi. Walaupun metode perhitungan empiris lebih baik, tetapi analisis yang dimiliki perhitungan empiris sangat sukar.

Perancangan jaringan pentanahan dengan perhitungan empiris berhubungan erat dengan lapisan yang dimiliki oleh tanah dan letak lapisannya. Lapisan yang dimiliki oleh tanah terdiri dari 2 lapisan tanah atau lebih, dan umumnya 2 lapisan yang paling sering digunakan dalam perancangan pentanahan. Pada 2 lapisan tanah, lapisan atas tanah memiliki karakteristik yang berbeda dengan lapisan bawah. Perbedaan ini juga yang akan mempengaruhi nilai tahanan yang ada pada tanah.

Penelitian tentang resistansi pada dua lapisan tanah pernah dilakukan yang dijadikan dasar penelitian ini. Penelitian ini dilakukan di tanah yang memiliki 2 lapisan. Pada tahapan pertama, beberapa

penyelesaian simulasi untuk jaringan yang sama ditanamkan di lapisan tanah yang ke-2 secara vertikal untuk mendapatkan besar tahanan tanah tersebut. Analisis dilakukan untuk mengetahui hubungan. Tahanan yang ada dipentanahan ketika jaringan pentanahan tersebut ditanam di media yang sejenis atau media yang memiliki 2 lapisan. Pentanahan gardu induk menghubungkan antara peralatan elektronik yang ada pada gardu induk dengan pentanahan dimana bahannya terbuat dari metal. Penelitian ini juga menghitung parameter yang memiliki kaitan dengan penggunaan pentanahan yang aman dilakukan untuk memeriksa jaringan pentanahan di gardu induk. Dalam grid grounding dengan jarak yang tidak sama, konduktor horizontal yang saling berhubungan ditempatkan pada ruang yang tidak sama sedemikian rupa sehingga konduktor grid yang lebih rapat dan berjarak dekat ditempatkan di dekat pinggiran grid daripada di tengah grid bumi. Jadi desain grid pembumian dengan jarak yang tidak sama mungkin lebih aman daripada jarak yang sama di mana ada ruang yang lebih besar antara konduktor horizontal di pusat grid dan jarak antara konduktor horizontal yang berdekatan secara bertahap dikurangi dari pusat ke pinggiran grid [1].

Perancangan sistem pentanahan memiliki beberapa parameter dimana parameter ini dapat berpengaruh kepada sistem pentanahan. Parameter tersebut adalah tegangan sentuh, tegangan langkah, dan tahanan pada grid. Grid yang dimodelkan

memiliki 3 bentuk, dengan model 1 menggunakan batangan-batangan elektroda dengan panjang masing-masing elektroda 3 m dengan ukuran jala-jala grid-gridnya 20x20 m, model 2 menggunakan elektroda 156 buah dengan panjang elektroda masing-masing 40x15 m, dan model 3 menggunakan 66 batangan dengan panjang masing-masing batangannya 6 m dan ukuran jala-jalanya sama dengan yang digunakan pada model 2.

II. STUDI PUSTAKA

2.1 Gardu Induk

Gardu induk merupakan bagian terpenting dari keseluruhan sistem tenaga dimana gardu induk berfungsi sebagai pembangkit energi listrik dan mentransmisikan energi listrik tersebut sebagai distribusi listrik ke konsumen. Saat jaringan energi yang pertama, pencampuran energi dan pembangkitan sumber-sumbernya telah berubah, fungsi dan hasil kerja dari gardu induk telah berubah tetapi peran gardu induk terhadap seluruh sistem tenaga tetap sama pentingnya. Ketika gardu induk dipasang untuk pertama kalinya, gardu induk dianggap masih berkaitan dengan pusat pembangkit tunggalnya dan karena keterkaitan ini maka nama "gardu induk" pertama kali digunakan[2].

2.2 Pentanahan

Simbol sinyal atau petanahan ekipotensial digunakan untuk tegangan referensi dari rangkaian listrik kegiatan simulasi. Pentanahan/pembumian digunakan untuk melepaskan arus tinggi ke bumi/tanah. Tegangan yang muncul yang disebabkan oleh tegangan elektrostatis diamati oleh beberapa sistem sehingga tegangan elektrostatis harus dikurangi dengan menggunakan tanah sasis. Tanah dan sasis pada umumnya digunakan dalam jaringan sistem tenaga.

Sistem pentanahan pada dasarnya menyediakan saluran yang memiliki nilai hambatan rendah untuk mencegah gangguan, mencegah sengatan petir dan menghindari potensial pada arus listrik. Gangguan yang terjadi di tanah yang diakibatkan gangguan satu fasa merupakan kesalahan yang paling umum dalam sistem tenaga listrik dan gangguan ini menyumbang 98% dari semua gangguan yang terjadi. Sistem pentanahan dibangun dengan menanam elektroda kedalam tanah yang mana elektroda tersebut dikenal sebagai "batang" yang ditanam secara vertikal dan batang tersebut bersifat "konduktor" apabila ditanam secara horizontal. Jaringan pentanahan terbentuk baik dari kombinasi konduktor dan batang atau hanya terbentuk dari konduktor saja. Jaringan ini biasanya digunakan dalam pentanahan gardu induk dan digunakan untuk pentanahan pembangkit listrik[3].

2.2.1 Grid Pentanahan

Jaringan pentanahan merupakan keseluruhan perangkat pengukuran yang digunakan untuk menghubungkan komponen listrik konduktif dengan

tanah (bumi) dalam suatu sistem tenaga listrik. Sistem pentanahan merupakan bagian terpenting dari jaringan tenaga listrik tegangan tinggi dan tegangan rendah yang memiliki setidaknya 4 aturan penting, seperti:

- Untuk melindungi dari serangan petir dengan memberikan jalur listrik dan mekanis kuat untuk arus agar dapat.
- Mengalir ke tanah, membatasi beda potensial diseluruh isolasi listrik menara yang terkena sambaran listrik dan mengurangi terjadinya hubungan singkat.
- Untuk meminimalkan energi guna memastikan sistem tenaga bekerja dengan benar dengan cara memberikan identifikasi yang tepat untuk sebuah gangguan sehingga sistem perlindungan yang tepat dapat beroperasi dan memberikan urutan impedansi yang dimulai dari Nol, serta untuk pengembalian arus bolak balik yang tidak seimbang.
- Untuk meminimalkan energi guna memastikan keamanan listrik dengan cara mengidentifikasi dengan cepat gangguan pada sistem sehingga durasi gangguan dapat dikurangi dan membatasi listrik yang tersentuh oleh tubuh sehingga arus yang mengalir ke tubuh tidak terlalu besar.
- Untuk memperkecil beberapa bahaya dan mengurangi energi yang lain yang berkontribusi terhadap elektromagnetik yang sesuai[4][5].

2.2.2 Batang Elektroda yang digunakan dalam Pentanahan

Sistem pentanahan yang dirancang dengan menggunakan batang elektroda. Batang elektroda tersebut ditanam dengan posisi secara vertikal (Gambar 1a) atau secara horizontal (Gambar 1b). Posisi batang elektroda yang ditanam menentukan besar tahanan tanah yang akan diukur[6].



a) Posisi Vertikal b) Posisi Horizontal

Gambar 1. Posisi Batang Elektroda yang ditanam

Persamaan tahanan tanah yang diperoleh dari penanaman batang elektroda secara vertical diperoleh dengan Persamaan:

$$R = \frac{1}{2\pi\sigma l} \ln \frac{4l}{d} \quad (2.1)$$

Untuk persamaan tanah dengan batang elektroda yang ditanam secara horizontal diperoleh [11]:

$$R = \frac{1}{2\pi\sigma l} \ln \frac{2l}{d} \quad (2.2)$$

Dengan :

$$R = \text{Tahanan Tanah yang diukur } (\Omega)$$

- σ = Konduktivitas tanah (S/m)
- l = Panjang batang elektroda (m)
- d = diameter batang elektroda (m)

2.2.3 Jenis-Jenis Tanah dalam pentanahan

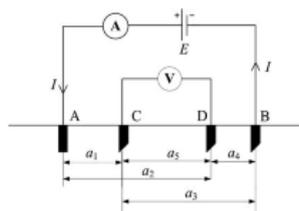
Klasifikasi tanah yang akan digunakan bergantung kepada kelembutan atau tekstur tanahnya. Tekstur tanah yang dimaksud berupa tampilan tanahnya dimana tampilannya bergantung kepada ukuran dan bentuk partikel dari tanah tersebut. Beberapa klasifikasi tanah adalah tanah berkerikil, tanah (pasir), tanah endapan (lumpur) dan tanah liat. Tanah berkerikil merupakan tanah yang terbentuk dari potongan-potongan batu dengan partikel yang dimiliki berupa kuarsa, *feldspar*, dan mineral – mineral lainnya.

Berbeda dengan tanah berkerikil, tanah berpasir terbentuk dari partikel kuarsa dan feldspar. Tanah berkerikil dan tanah berpasir memiliki struktur lapisan yang menampung air cukup banyak dan kedua tanah ini memiliki molekul berupa nitrogen sehingga tanah berkerikil atau tanah berpasir tidak sesuai untuk pentanahan[7].

Tanah endapan (lumpur) tersusun dari partikel kuarsa dengan ukuran partikelnya berkisar 0,06-0,002 mm. Tanah endapan dapat menampung air lebih sedikit dari tanah liat dengan ukuran untuk 1 gram tanah endapan untuk 15,9 ft². Tanah endapan memiliki molekul yang lebih rapat dibandingkan dengan tanah berpasir.

Tanah liat merupakan tanah yang lebih padat jika dibandingkan dengan tanah yang lain. Tanah liat memiliki ukuran partikel yang lebih kecil dari 0,002 mm dan struktur tanahnya terbentuk dari mika, mineral-mineral tanah liat dan mineral-mineral lainnya. Tanah liat memiliki kemampuan untuk menampung air secukupnya dengan waktu penampungannya sangat lama. Oleh karena daya tampung air yang cukup lama, tanah liat sangat baik untuk sistem pentanahan.

Bidang arus dihasilkan oleh keduanya probe arus luar kemudian menghasilkan potensial pada dua probe dalam, dan tegangan antara dua probe dalam C dan D diukur dengan meter perbedaan potensial atau meter tegangan resistansi tinggi, dan hasil dari U / I adalah resistansi pentanahan. R . Dengan mengukur resistivitas yang tampak di bawah jarak probe yang berbeda, kita dapat memperoleh suatu hubungankurva untuk resistivitas semu yang diukur melalui jarak probe untuk menentukan struktur geologi serta resistivitas dan kedalaman setiap lapisan tanah [8].



Gambar 2. Pengukuran dengan Menggunakan Metode Wenner 4 Kutub

2.2.4 Tahanan Pada Pentanahan

Estimasi berdasarkan klasifikasi tanah hanya menghasilkan perkiraan kasar resistivitas. Tes resistivitas yang sebenarnya sangat penting. Ini harus dilakukan di sejumlah tempat di dalam situs. Tempat-tempat stasiun di mana tanah dapat memiliki resistivitas seragam di seluruh area dan sampai kedalaman cukup dalam jarang ditemukan. Biasanya, ada beberapa lapisan, masing-masing memiliki resistivitas berbeda. Seringkali, perubahan lateral juga terjadi, tetapi dibandingkan dengan yang vertikal, perubahan ini biasanya lebih bertahap. Tes resistivitas tanah harus dilakukan untuk menentukan apakah ada variasi penting dari resistivitas dengan kedalaman. Jumlah bacaan yang diambil harus lebih besar di mana variasinya besar, terutama jika beberapa bacaan sangat tinggi untuk menyarankan kemungkinan masalah keamanan[11]. Jika resistivitas bervariasi dengan kedalaman, sering diinginkan untuk menggunakan rentang jarak probe yang meningkat untuk mendapatkan estimasi resistivitas lapisan yang lebih dalam. Ini dimungkinkan karena, ketika jarak probe meningkat, arus sumber uji menembus semakin banyak daerah yang jauh, di kedua vertikal dan arah horizontal, terlepas dari seberapa banyak jalur saat ini terdistorsi karena kondisi tanah yang bervariasi (Manual on Ground Resistance Testing [B105]). Sejumlah teknik pengukuran dijelaskan secara rinci dalam IEEE Std 81. Metode Wenner empat kutub, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, adalah teknik yang paling umum digunakan. Singkatnya, empat probe didorong ke bumi sepanjang garis lurus, pada jarak yang sama satu terpisah, didorong ke kedalaman b .

Menurut Sverak, nilai tahanan pentanahan grid gardu induk pada kedalaman tertentu berdasarkan persamaan 2.3 berikut [12] :

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20} A} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (2.3)$$

Dimana :

R_g = Tahanan grid pada pentanahan (Ω)

ρ = Tahanan jenis tanah (Ω -m)

A = Luas area pentanahan grid (m^2)

h = Kedalaman penanaman konduktor (m)

L_t = Total dari panjang konduktor yang tertanam (m)

Tegangan antara dua elektroda dalam (potensial) kemudian diukur dan dibagi dengan arus antara dua elektroda luar (arus) untuk memberikan nilai resistansi R , sehingga [13][14]:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.4)$$

Dimana:

ρ_a = tahanan jenis tanah yang timbul (Ω -m)

R = tahanan yang sedang diukur (Ω)

a = jarak antara elektroda satu dengan elektroda yang lainnya (m)
 b = kedalaman elektroda (m)

Jika b kecil dibandingkan dengan a , seperti halnya probe menembus tanah hanya jarak pendek, Persamaan (2.1) dapat dikurangi menjadi :

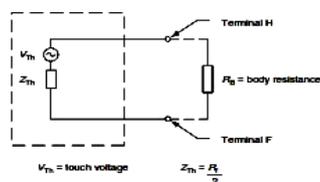
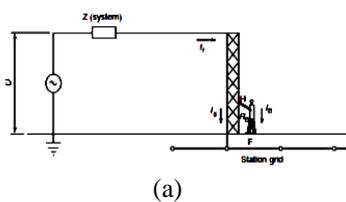
$$\rho_a = 2\pi a R \tag{2.5}$$

Arus cenderung mengalir di dekat permukaan untuk jarak probe kecil, sedangkan lebih banyak arus menembus tanah yang lebih dalam untuk jarak yang besar. Jadi, biasanya merupakan perkiraan yang masuk akal untuk mengasumsikan bahwa resistivitas yang diukur untuk jarak probe yang diberikan mewakili resistivitas tanah yang jelas sampai kedalaman ketika kontras resistivitas lapisan tanah tidak berlebihan. Dengan demikian, Persamaan (2.1) dan Persamaan (2.2) dapat digunakan untuk menentukan resistivitas semu ρ pada kedalaman a [15].

2.3 Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah

Seseorang yang mengalami suatu kondisi dimana orang tersebut sedang berada atau sedang berada di sekeliling gardu induk sehingga orang tersebut dapat menjadi bagian rangkaian pentanahan. Tegangan sentuh yang diilustrasikan pada Gambar 2.3a yang menggambarkan arus gangguan dilepaskan ke bumi oleh sistem pentanahan gardu induk dan seseorang yang menyentuh struktur pentanahan gardu induk yang terbuat dari metal. Gambar 3b menunjukkan ekivalen Thevenin dirangkaian secara paralel (Z_{Th}) dianggap sebagai langkah seseorang dan dirangkaian secara seri dengan tahanan yang ada pada tubuh orang tersebut (R_B). Tegangan (V_{Th}) yang berada diantara H dan F ketika seseorang tersebut tidak ada sedangkan arus yang mengalir pada tubuh dimisalkan dengan I_B . ketika Z_{TH} sebanding dengan tahanan yang ada pada langkah orang tersebut dimana tahanan tersebut dirangkaian secara paralel, sehingga persamaan tegangan sentuh tersebut menjadi [16]:

$$E_{touch} = I_B (R_B + Z_{Th}) \tag{2.6}$$



Gambar 3. (a) Paparan Tegangan Sentuh dan (b) Rangkaian Ekivalen Tevenin dari Tegangan Sentuh

Kondisi yang terjadi saat tegangan langkah diilustrasikan pada Gambar 3(a) dan rangkaian ekivalen Tevenin dari tegangan langkah diilustrasikan pada Gambar 3(b). Impedansi dari ekivalen Thevenin untuk kaki seseorang (Z_{Th}) dimana impedansi tersebut dirangkaian secara seri terhadap tahanan pada tubuh (R_B). Berdasarkan dari impedansi rangkaian ekivalen Thevenin maka tegangan langkah dapat dirumuskan menjadi:

$$E_{step} = I_B (R_B + Z_{Th}) \tag{2.7}$$

Tahanan yang dihasilkan dari kaki orang tersebut (Ω) diilustrasikan dengan piringan metal yang berbentuk bulat dengan piringan metal tersebut terletak pada permukaan tanah yang sejenis dengan tahanan tanahnya ρ ($\Omega - m$) dan sebanding dengan:

$$R_f = \frac{\rho}{4b}$$

Dengan asumsi $b=0,08$, dan $R_f = 3\rho$. Impedansi pada ekivalen Thevenin yang terdapat dilangkah dari orang tersebut dirangkaian paralel pada tegangan sentuh (E_{sentuh}), persamaan menjadi:

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2} = 1,5\rho \tag{2.9}$$

Impedansi dari ekivalen Thevenin pada kedua kaki orang tersebut pada rangkaian seri pada tegangan langkah, $E_{langkah}$, persamaannya menjadi [15]:

$$Z_{Th} = 2R_i = 6\rho \tag{2.10}$$

Persamaan di atas mengasumsikan resistivitas tanah yang seragam. Di gardu induk, lapisan tipis bahan resistivitas tinggi sering tersebar di permukaan bumi untuk memperkenalkan kontak dengan resistansi tinggi antara tanah dan kaki, sehingga mengurangi arus tubuh. Faktor penurunan lapisan permukaan, C_s , meningkatkan ketahanan kaki dan tergantung pada nilai relatif dari resistivitas tanah, bahan permukaan, dan ketebalan bahan permukaan. Persamaan berikut memberikan resistensi tanah pada material permukaan [15]:

$$R_i = \left[\frac{\rho_s}{4b} \right] C_s \tag{2.11}$$

$$C_s = 1 + \frac{16b}{\rho_s} \sum_{n=1}^{\infty} K^n R_m (2nh_s) \tag{2.12}$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \tag{2.13}$$

Dimana :

= faktor derating lapisan permuka

K =faktor refleksi antara resistivitas material yang berbeda

ρ_s =resistivitas bahan permukaan dalam Ω -m

ρ = resistivitas bumi di bawah permukaan material dalam Ω -m

h_s = ketebalan material permukaan dalam m = jari-jari cakram logam bundar yang mewakili kaki dalam m

$R_m = (2nh_s)$ = resistansi tanah timbal balik antara dua pelat yang sama, paralel, dan koaksial,

terpisah oleh jarak ($2nh_s$), dalam media resistivitas tak terbatas ρ_s dalam Ω -m. Sehingga faktor derating lapisan permukaan (C_s) diperoleh [17]:

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1-\frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s+0,09} \quad (2.14)$$

Dengan asumsi berat badan lebih konservatif 50 kg untuk menentukan arus tubuh yang diizinkan dan daya tahan tubuh 1000 V, tegangan sentuh yang dapat ditoleransi adalah [18]:

$$E_{sentu\ h50} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.15)$$

Dan tegangan langkah yang ditoleransi adalah:

$$E_{Langka\ h50} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.16)$$

Sedangkan untuk menentukan arus tubuh yang diizinkan dan daya tahan tubuh 1000 V dengan berat badan lebih konservatif 70 kg, maka tegangan sentuh yang ditoleransi adalah [15]:

$$E_{sentu\ h70} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.17)$$

$$E_{Langka\ h70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.18)$$

Dimana : $E_{Langka\ h}$ = Tegangan langkah (V)

$E_{Sentu\ h}$ = Tegangan Sentuh (V)

C_s = diambil dari persamaan (2.10)

ρ_s = tahanan dari permukaan bahan ($\Omega - m$)

2.4 Menentukan Jumlah Konduktor pada Pentanahan

Metode untuk menentukan banyak grid yang digunakan pada pentanahan yaitu, menggunakan empat komponen bentuk kotak yang dikembangkan oleh Thapar, Gerez, Balakrishnan, dan Blank. Jumlah konduktor paralel yang efektif dapat dibuat untuk bentuk persegi panjang atau konduktor berbentuk tidak beraturan yang mewakili jumlah konduktor paralel dari konduktor persegi panjang yang setara.

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (2.19)$$

untuk menentukan nilai n_a , n_b , n_c dan n_d menggunakan Persamaan

$$n_a = 2 \times LCLp \quad (2.20)$$

$$n_b = \sqrt{Lp} \times 4 \times \sqrt{A} \quad (2.21)$$

$$n_c = [Lx \times Ly \times A] \times 0,7 \times A \times Lx \times Ly \quad (2.22)$$

$$n_d = Dm \sqrt{Lx^2 + Ly^2} \quad (2.23)$$

Dimana :

$n_b = 1$ untuk konduktor persegi

$n_c = 1$ untuk konduktor persegi dan persegi panjang

$n_d = 1$ untuk konduktor persegi, persegi panjang, berbentuk L dan berbentuk T

LC = panjang total konduktor dalam konduktor horizontal (m)

Lp = panjang keliling dari konduktor (m)

A = luas konduktor (m²)

Lx = panjang konduktor sejajar x (m)

Ly = panjang konduktor sejajar sumbu y (m)

Dm = jarak maksimum antara dua titik di konduktor (m)

Untuk bentuk batang pentanahan yang tidak beraturan, Ki digunakan bersama dengan n yang didefinisikan di atas adalah:

$$Ki = 0.644 + 0.148 \times n \quad (2.24)$$

Total panjang konduktor yang digunakan dalam suatu sistem pentanahan dengan kombinasi grid dan rod dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.23).

$$LT = Lg + Lr \quad (2.25)$$

Untuk menentukan panjang konduktor bentuk pentanahan bujur sangkar menggunakan Persamaan (2.19):

$$LT = 2.n.L + Lr.Nr \quad (2.26)$$

Untuk menentukan panjang konduktor bentuk pentanahan persegi menggunakan Persamaan (2.20) dan Persamaan (2.21) [15]:

$$Lg = (Lx.ny) + (Ly.nx) \quad (2.27)$$

$$LT = Lg + Lr.Nr \quad (2.28)$$

Dimana:

LT = Panjang total konduktor (m)

Lr = Panjang rod (m)

Lg = Panjang konduktor grid (m)

Nr = Banyak rod

nx = jumlah batang konduktor sejajar sumbu x (m)

ny = jumlah batang konduktor sejajar sumbu y (m)

III. METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh lapisan tanah terhadap rancangan pentanahan di Gardu induk Galang, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara-Indonesia.

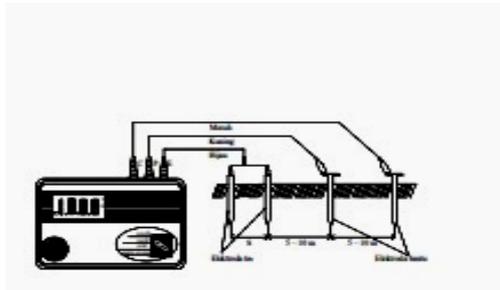
3.1 Perancangan Grid Pentanahan

Setelah pengukuran yang dilakukan di lapangan maka selanjutnya, dilakukan pemodelan / perancangan grid yang sesuai dengan data yang akan diambil. Grid yang dirancang pada umumnya berbentuk persegi panjang dan dimensi grid yang akan dirancang sesuai dengan data yang akan diambil. Perancangan grid akan dimodelkan menggunakan perangkat lunak dan data yang diperoleh dari simulasi berupa grafik yang kemudian akan dianalisis.

3.2 Langkah-langkah pelaksanaan pengukuran lapisan tanah

- Mempersiapkan elektroda pentanahan dan alat-alat bantu pemasangannya.
- Dilakukan pengecekan tegangan baterai dengan menghidupkan Digital Earth Resistance Tester. Jika layar tampak bersih tanpa simbol baterai lemah berarti kondisi baterai dalam keadaan baik. Jika layar menunjukkan simbol baterai lemah atau bahkan layar dalam keadaan gelap berarti baterai perlu diganti.
- Membuat rangkaian pengujian seperti pada Gambar 4 dengan menanam elektroda utama

dan elektroda bantu. Menanam elektroda dengan memukul kepala elektroda menggunakan martil, jika menjumpai lapisan tanah yang keras sebaiknya jangan memaksakan penanaman elektroda.



Gambar 4. Skematik pemasangan elektroda pentanahan dan elektroda bantu untuk proses pengukuran tahanan tanah.

- d. Menentukan jarak antar elektroda bantu minimal 5 meter dan maksimal 10 meter.
- e. Mengukur tegangan tanah dengan dengan mengarahkan range switch ke earth voltage dan pastikan bahwa nilai indikator 10 V atau kurang. Jika earth voltage bernilai lebih tinggi dari 10 V diperkirakan akan terjadi banyak kesalahan dalam nilai pengukuran tahanan.
- f. Mengecek penghubung atau penjepit pada elektroda utama dan elektroda bantu dengan mensetting range switch ke 2000Ω dan tekan tombol "PRESS TO TEST". Jika tahanan elektroda utama terlalu tinggi atau menunjukkan simbol " " yang berkedip-kedip maka perlu dicek penghubung atau penjepit pada elektroda utama.
- g. Melakukan pengukuran. Mensetting range switch ke posisi yang diinginkan dan tekan tombol "PRESS TO TEST" selama beberapa detik.
- h. Mencatat nilai ukur tahanan yang muncul dari Digital Earth Resistance Tester.
- i. Mengembalikan posisi tombol "PRESS TO TEST" ke posisi awal.
- j. Melakukan pengujian tahanan untuk kedalaman elektroda yang berbeda dengan langkah 3, 7, 8, 9.
- k. Perubahan kedalaman elektroda utama adalah sebesar 0.5 m pada tiap tiap pengukuran.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada sistem pentanahan gardu induk merupakan sistem pentanahan yang terintegrasi pada sistem ketenaga listrikan, dimana sistem pentanahan ini berfungsi sebagai keamanan sistem secara keseluruhan dari gangguan yang mungkin terjadi pada peralatan- peralatan yang terdapat pada gardu induk. Sistem pentanahan pada gardu induk adalah menerapkan penanaman elektroda (konduktor) didalam tanah secara vertikal (rod) dan secara horizontal (sejajar dengan permukaan tanah) dengan

bentuk kisi- kisi (grid).dimana bentuk kisi- kisi ini adalah kombinasi bentuk vertikal dan horizontal.

Sistem pentanahan yang efektif pada suatu gardu induk harus memenuhi beberapa persyaratan diantaranya.

1. Membuat jalur impedansi yag sangat kecil ke tanah dengan menggunakan rangkaian yang efektif.
2. Dapat menyebarkan gangguan berulang- ulang
3. Menggnakan bahan tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah .
4. Menggunakan sistem mekanik yang kuat dan tahan lama serta murah dalam pelayanan.
5. Menjaga gradien tegangan maksimum di sepanjang permukaan didalam dan disekitar gardu dalam batas aman selama gangguan terjadi

Sistem pentanahan pada gardu induk yang merupakan kombnasi antar grid dan ditanam secara horizontal serta vertikal merupakan sistem yang paling serig digunakan diberbagai negara , alasannya adalah karna kombinasi antar grid menyebabkan gradien tegangan pada sistem akan lebih rata serta tahanan pentanahan lebih kecil.

4.1 Sistem Pentanahan Gardu Induk 2x500 MVA Galang

Gardu induk yang terletak di Desa Petungguhen, Kecamatan Galang, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara ini memiliki kapasitas sebesar 2 x 500 MVA. Gardu induk ini memiliki 2 sistem yakni sistem 150 kV dan 275 kV.

Tabel 1. Data-data pentanahan gardu induk 2 x 500 MVA Galang lapis pertama.

Data	Keterangan
Jenis konduktor <i>grid</i>	Copper Conductor – Hard 1x150 sqmm
Jenis konduktor <i>rod</i>	Copper d=17.33 mm
Kedalaman penanaman <i>grid</i> (<i>h</i>)	0.8 m
Panjang konduktor <i>rod</i> (<i>Lr</i>)	1.5 m
Tahanan jenis tanah (<i>ρ</i>)	127.94 Ω.m / 284.09 Ω.m (dengan kedalaman 4.48 m)
Tahanan jenis batu koral (<i>Ω₂</i>)	5000 Ω.m
Ketebalan permukaan batu koral (<i>h₂</i>)	0.2 m
Faktor pembagi arus (<i>S₂</i>)	0.6
Faktor pengurangan (<i>D₂</i>)	1.128 (dengan X/R=10)
Lama waktu gangguan (<i>t_g</i>)	0.35 s
Arus gangguan (<i>3I_o</i>)	40000 A

Perhitungan faktor reduksi berdasarkan persamaan 2.14 dengan menggunakan *matlab*:

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0,09}$$

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{127,94}{5000})}{(2(0,2)) + 0,09}$$

$$C_s = 0,82$$

Berdasarkan hasil dari perhitungan faktor reduksi, maka tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat manusia 50 kg dan 70 Kg pada lapisan tanah yang pertama dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.15) dan (2.17).

$$E_{sentu\ h50} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{sentu\ h50} = (1000 + 1,5[0,82][5000]) \frac{0,116}{\sqrt{0,35}}$$

$$E_{sentu\ h50} = 1403,5\ V$$

$$E_{sentu\ h70} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{sentu\ h70} = (1000 + 1,5[0,82][5000]) \frac{0,157}{\sqrt{0,35}}$$

$$E_{sentu\ h70} = 1899,5\ V$$

Sedangkan untuk tegangan langkah yang diizinkan untuk berat manusia 50 kg dan 70 Kg pada lapisan pertama dapat dihitung menggunakan persamaan (2.16) dan (2.18).

$$E_{Langka\ h50} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{Langka\ h50} = (1000 + 6[0,82][5000]) \frac{0,116}{\sqrt{0,35}}$$

$$E_{Langka\ h50} = 5052,6$$

$$E_{Langka\ h70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{Langka\ h70} = (1000 + 6[0,82][5000]) \frac{0,157}{\sqrt{0,35}}$$

$$E_{Langka\ h70} = 6801,9$$

4.2 Pentanahan Gardu Induk 2 x 500 MVA Sistem 275 kV Galang pada lapisan kedua tanah.

Dalam bagian ini penulis akan menyajikan data-data yang diperoleh dalam percobaan di lapangan yaitu pada Gardu Induk di Desa Petangguhen, Kecamatan Galang, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara untuk perencanaan perancangan model pentanahan dan juga membuat rancangan model pentanahan untuk bentuk- bentuk lainnya (bentuk L, bentuk T, bentuk Tambah, dan bentuk Segitiga) untuk melihat hasil yang diperoleh dari

perbedaan bentuk pentanahan baik dari aspek sistem pentanahannya dan juga dari aspek ekonomisnya.

Tabel 2. Data-data pentanahan gardu induk 2x500 MVA Galang pada lapisan kedua tanah.

Data	Keterangan
Jenis konduktor <i>grid</i>	Copper Conductor – Hard 1x150 sqmm
Jenis konduktor <i>rod</i>	Copper d=17.33 mm
Kedalaman penanaman <i>grid</i> (<i>h</i>)	0.8 m 1.4 m (hasil percobaan)
Panjang konduktor <i>rod</i> (<i>L_r</i>)	1.5 m 1 m (hasil percobaan)
Tahanan jenis tanah (ρ) Lapisan pertama	127.94 Ω .m / 284.09 Ω .m
Tahanan jenis tanah (ρ) Lapisan kedua	42.02 (hasil percobaan)
Tahanan jenis batu koral (ρ_2)	5000 Ω .m
Ketebalan permukaan batu koral (<i>h₂</i>)	0.2 m
Faktor pembagi arus (<i>S_f</i>)	0.6
Faktor pengurangan (<i>D_f</i>)	1.128 (dengan X/R=10)
Lama waktu gangguan (<i>t_f</i>)	0.35 s
Arus gangguan (<i>I_{f0}</i>)	40000 A

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{42,02}{5000})}{(2(1,4)) + 0,09}$$

$$C_s = 0,805$$

Berdasarkan hasil dari perhitungan faktor reduksi, maka tegangan sentuh yang diizinkan untuk berat manusia 50 kg dan 70 Kg pada lapisan tanah yang kedua dapat dihitung menggunakan Persamaan :

$$E_{sentu\ h50} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{sentu\ h50} = (1000 + 1,5[0,805][5000]) \frac{0,116}{\sqrt{0,35}}$$

$$E_{sentu\ h50} = 1398.647\ V$$

$$E_{sentu\ h70} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{sentu\ h70} = (1000 + 1,5[0,805][5000]) \frac{0,157}{\sqrt{0,35}}$$

$$E_{sentu\ h70} = 1892.996\ V$$

Sedangkan untuk tegangan langkah yang diizinkan untuk berat manusia 50 kg dan 70 Kg pada lapisan tanah yang kedua dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.16) dan (2.18).

$$E_{Langka\ h50} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{Lanka\ h50} = (1000 + 6[0,805][5000]) \frac{0,116}{\sqrt{0,35}}$$

$$E_{Langka\ h50} = 5006.359\ V$$

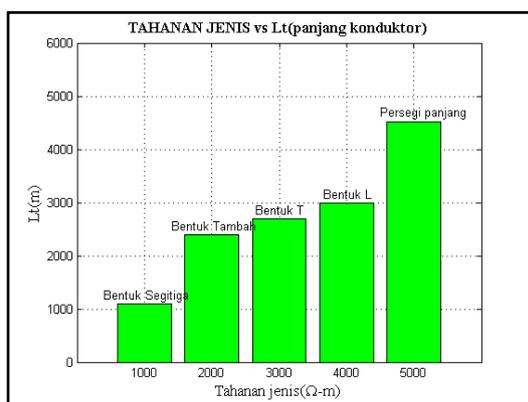
$$E_{Lanka\ h70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{Langka\ h70} = (1000 + 6[0,805][5000]) \frac{0,157}{\sqrt{0,35}}$$

$$E_{Langka\ h70} = 6775.848\ V$$

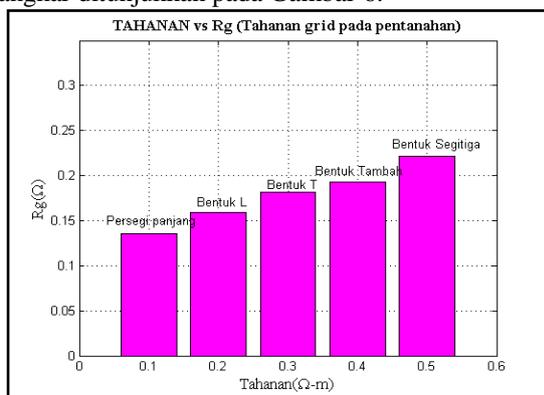
Hasil grafik yang ditampilkan dibawah ini adalah pada kondisi normal (kering).

Pengaruh Tahanan terhadap besar nilai Lt pada desain sistem pentanahan bentuk bujur sangkar ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan antara Tahanan jenis dan Lt (panjang konduktor).

Pengaruh Tahanan jenis terhadap besar nilai Rg pentanahan desain sistem pentanahan bentuk bujur sangkar ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik hubungan antara Tahanan jenis dan nilai Rg pentanahan.

V. KESIMPULAN

Hasil dari analisis yang dilakukan di sekitar Gardu induk pembangkit tenaga listrik Galang (± 300 m dari Gardu induk) maka di peroleh suatu kesimpulan perancangan sistem pentanahan Gardu

induk 2 x 500 MVA Galang sistem 275 KV sebagai berikut:

1. Pentanahan gardu induk 2 x 500 MVA Galang sistem 275 KV, kombinasi antara konduktor grid dan rod nya memenuhi persyaratan berdasarkan standart IEEE STD.80-2013 dan dikategorikan sebagai sistem pentanahan yang aman.
2. Dari percobaan yang pernah dilakukan sebelumnya pada lokasi yang sama diperoleh nilai tegangan sentuh yang diizinkan yaitu 1075,1 < 1403,5 V untuk berat badan 50 Kg dan 1075V < 1899.5 V untuk berat badan 70 Kg. Serta besarnya tegangan langkah yang sebenarnya lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan yaitu 635,5 V < 5025.6 V untuk berat badan 50 Kg dan 636,4 V < 6801.9 V untuk berat badan 70 Kg. Besarnya tahanan pentanahan adalah 0.46 Ohm sesuai dengan rekomendasi IEEE yaitu lebih kecil dari 1 Ohm untuk 1 lapisan tanah dengan kedalaman konduktor 0,8 m.
3. Dari percobaan penulis diperoleh nilai tegangan sentuh yang diizinkan yaitu 1398.647 < 1403,5 V untuk berat badan 50 Kg dan 1892.996 V < 1899.5 V untuk berat badan 70 Kg. Serta besarnya tegangan langkah yang sebenarnya lebih kecil dari tegangan langkah yang diizinkan yaitu 5006,359 V < 5025.6 V untuk berat badan 50 Kg dan 6775,84 V < 6801.9 V untuk berat badan 70 Kg. Besarnya tahanan pentanahan adalah 0.131 Ohm sesuai dengan rekomendasi IEEE yaitu lebih kecil dari 1 Ohm untuk 2 lapisan tanah dengan kedalaman konduktor 1,4 m.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Zhou, J. He, H. Xu, P. Wang, Y. Chen, and S. Chen, 2017, *Simulation Of Impact Of Vertical Grounding Electrode On Impulse Grounding Resistance Of Substation Grounding Network*, 2nd Int. Conf. Integr. Circuits Microsystems, ICICM 2017, vol. 2017-November, pp. 18–22, 2017, doi: 10.1109/ICAM.2017.8242130.
- [2] P. Harahap, M. Adam, and A. Prabowo, 2019, *Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 Kv Mengurangi Beban Overload Dan Jutah Tegangan Pada Trafo Bl 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etab 12.6.0*, RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro, vol. 1, no. 2, pp. 62–69, doi: 10.30596/rele.v1i2.3002.
- [3] E. Padilla, 2015, *Substation Automation Systems: Design and Implementation, Substation Autom. Syst. Des. Implement.*, pp. 1–251, doi: 10.1002/9781118987216.
- [4] P. E. Sutherland, *Principles of Electrical Safety (IEEE Press Series on Power and Energy Systems) 1st Edition*, pp. 4–7.

- [5] Anup Kumar,Vijay Kumar, 2018, *Unequally Spaced Grounding Grid Designed from Equally Spaced Grounding Grid for 220/132 kV Substation*, International Conference On Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT),pp 114-116.
- [6] John D. Mc Donald, 2007, *Electric Power Substations Engineering*, Second Edition, CRC Press Taylor&Francis Group, United States of America.
- [7] Si Wenrong, et al, 2015, *Study on Impulse Characteristics of 3kV Substation Grounding Grid*, TENCON, pp.1-4.
- [8] A. Puttarach, et al, 2007, *Substation Grounding Grid Analysis with the Variation of Soil Layer Depth Method*, IEEE Lausanne Power Tech, pp.1881-1886.
- [9] Xiaobin Cao, et al, 2008, *A Simple Formula of Grounding Grid Resistance in Vertical Two-Layer Soil*, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp.1-5.
- [10] Chetan S. Payshetti, Dr. H.T.Jadhav, Shrihari Kulkarani, 2007, *Analysis of Grounding Grid of Substation*, International Conference on Circuits Power and Computing Technologies, pp.1181-1184.
- [11] Evelio Padila, 2016, *Substation Automation System Design and Implementation*, John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom.
- [12] Terry Krieg, John Finn, 2019, *Substations*, International Council on Large Electric Systems (CIGRE)/Springer, France.
- [13] Peter E Sutherland, 2015, *Principles of Electrical Safety*, John Wiley & Sons, Ltd., Canada.
- [14] John D.McDonald, 2007, *Electric Power Substations Engineering*, Second Edition, CRC Press Taylor&Francis Group, United States of America.
- [15] Dejan B.Jovanovic, Nenad N.Cvetkovic, Aleksa T. Ristic, Vladimir B. Stankovic, 2015, *Different Calculation Methods and Experimental Validation for Various Ground Electrode Types*, The 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Romania, pp.337-342.
- [16] Md.Abdus Salam, Quazi M.Rahman, 2016, *Power Systems Grounding*, Springer, Singapore.
- [17] Jiang Li He, Rong Zeng, Bo Zhang, 2013, *Methodology and Thechnology for Power System Grounding*, John Wiley and Sons, Singapore.
- [18] Substations Committee, 2013, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, New York, pp.10016-5997.