

# ANALISIS PENENTUAN TEGANGAN MESH TERHADAP FAKTOR KOREKSI KETIDAKRATAAN KECEPATAN DAN KERAPATAN ARUS PADA FAKTOR GEOMETRI ELEKTRODA PADA GARDU INDUK

Muh Anwar<sup>1</sup>, Nur Fajri<sup>2</sup>, Rizal Ahdiyati Duyo<sup>3</sup>, Zahir Zainuddin<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar,

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Politeknik Makassar

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

[anwar01januari@gmail.com](mailto:anwar01januari@gmail.com)<sup>1</sup> [fajri3338@gmail.com](mailto:fajri3338@gmail.com)<sup>2</sup> [rizalduyo@poliupg.ac.id](mailto:rizalduyo@poliupg.ac.id)<sup>3</sup> [zahirzainuddin@gmail.com](mailto:zahirzainuddin@gmail.com)<sup>4</sup>

**Abstract :** The purpose of this study is to explain the operating system of the Sinjai PLTD, explaining the parallel work between the Sinjai PLTD and the PLN source. Several research methods were used by the author to obtain data about the operation of the Sinjai PLTD system, namely the Literature Study Method, the Observation Study Method, and the Discussion Method. The time for this final assignment will be carried out for 6 months, starting from October 2022 to March 2023 according to the time plan contained in the research schedule. The research was conducted in Sinjai Regency on the Sinjai diesel power plant. contains the steps taken by the author in compiling this final project. The results obtained in this study are based on the operation of generators in PLTD Kab. Sinjai uses an operating system in accordance with the Standard Operating Procedure (SOP) which is generally used in power plants for small PLTD units, namely generators with generators that do not operate for 24 hours and have a power capacity of below 10 MW. The capacity of the protection relay and breaker used is set at 12.7 watts on the relay, so this generator has been protected at 8.59% of the power installed on the generator. Short circuit to determine the breaker (OCB) which is installed in a continuous current rating of 630 Amperes and when there is an increase in current that exceeds the value of the current rating (630 A), the OCB will work to disconnect the system. The OCB installed in the Sinjai PLTD has met the requirements. Based on the results of this test, an analysis and conclusion can be drawn that in order to meet the continuous power supply needs of the three generators that are currently operating and still functioning properly, they must be maintained.

**Keywords:** generator, analysis, voltage current

**Abstrak-** Adapun Tujuan Penelitian Ini adalah untuk Menentukan perbandingan tegangan sentuh maksimum sebenarnya (*mesh*) pada sistem pembumian *grid* dan *grid-rod*. Menentukan perbandingan besarnya nilai tahanan pembumian pada sistem pembumian *grid* dan *grid-rod*. Beberapa metode penelitian yang penulis lakukan dalam memperoleh data tentang penentuan tegangan mesh terhadap faktor koreksi ketidakrataan kecepatan dan arus dan kerapatan arus pada faktor geometri elektroda pada gardu induk yaitu Metode Study Literature, Metode Study Observasi, Metode Diskusi. Adapun waktu tugas akhir ini akan dilaksanakan dimulai pada bulan maret 2022 sampai dengan bulan agustus 2022 dan tempat untuk melakukan kegiatan penelitian ini adalah pada Gardu Induk Tallo Lama. berisikan langkah-langkah yang ditempuh penulis dalam menyusun tugas akhir ini. Adapun hasil yang di dapatkan pada penelitian ini Berdasarkan pada sistem pembumian *grid* dengan jarak konduktor paralel  $D = 3$  meter dan panjang total konduktor pembumian 1422 meter memiliki tegangan *mesh* sebesar 521,72 volt, sedangkan pada sistem pembumian *grid-rod* dengan jarak konduktor paralel  $D = 3$  meter dan panjang total konduktor pembumian 1578 meter dengan elektroda *rod* sebanyak 65 batang memiliki tegangan *mesh* sebesar 461,18 volt. Nilai tahanan pembumian pada sistem pembumian *grid* dengan jarak konduktor paralel  $D = 3$  meter dan panjang total konduktor pembumian 1422 meter adalah 1,014  $\Omega$ , sedangkan nilai tahanan pembumian pada sistem pembumian *grid-rod* dengan jarak konduktor paralel  $D = 3$  meter dan panjang total konduktor pembumian 1578 meter dengan elektroda *rod* sebanyak 65 batang adalah 1,007  $\Omega$ .

**Kata kunci :** geometri elektroda, tegangan mesh, kecepatan

## I. PENDAHULUAN

Dalam ilmu sistem tenaga listrik, terdapat berbagai macam pengamanan tenaga listrik salah satunya adalah dengan pembumian peralatan, yang berfungsi melindungi bahaya arus listrik terhadap manusia, peralatan maupun bangunan. Pembumian merupakan salah satu cara pengurangan pengaruh arus listrik yang dapat terjadi akibat adanya arus bocor atau hubungan singkat karena kegagalan isolasi, surja petir dan bencana alam.

Secara umum pembumian merupakan melakukan koneksi, baik disengaja atau tidak disengaja sirkuit listrik atau peralatan ke bumi/bodi konduksi yang ditempatkan di bumi. Hal ini dilakukan untuk mempertahankan potensial bumi pada konduktor yang terhubung dan mengalirkan arus tanah menuju dan dari bumi. Pembumian peralatan merupakan bentuk pembatasan tegangan antara bagian alat-alat yang tidak dilalui arus dan antara bagian alat-alat ini dengan tanah sampai didapatnya suatu harga tertentu sehingga tahanan aman bagi semua kondisi operasional. Untuk itu maka diperlukan adanya peralatan atau instalasi dalam sistem pembumian itu sendiri yang berguna untuk memperoleh potensial yang merata dalam semua bagian struktur dan peralatan, serta untuk menjaga agar orang yang berada di sekitar daerah instalasi tetap aman karena kondisi potensial yang sama setiap waktu.

Oleh karena itu, suatu Gardu Induk harus memiliki sistem pembumian yang aman dan handal sesuai dengan standar persyaratan yang berlaku. Maka perlu adanya suatu pengujian tingkat keamanan dan keandalan dari sistem pembumiannya. Sehubungan dengan hal ini penulis melakukan pengujian dari sistem pembumian pada suatu gardu induk khususnya sistem pembumian *grid* dan *grid-rod* untuk mengetahui tingkat keamanan dan keandalannya.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Sistem Pembumian

Pembumian peralatan adalah penghubungan bagian-bagian dari peralatan listrik yang pada keadaan normal tidak dilalui arus. Titik berat dari tujuan pembumian peralatan adalah untuk keselamatan orang yang berada dalam suatu daerah gardu induk pada saat terjadi suatu gangguan. Disamping itu pembumian juga bertujuan untuk mencegah kemungkinan terjadinya kerusakan pada peralatan akibat gangguan tersebut. *Definisi pentanahan (Grounding)*, berdasarkan IEEE dictionary (standard 100), adalah melakukan koneksi, baik disengaja atau tidak disengaja, sirkuit listrik atau peralatan ke bumi, atau ke bodi konduksi yang ditempatkan di bumi. *Hal ini dilakukan untuk mempertahankan potensial bumi pada konduktor yang terhubung dan mengalirkan arus tanah menuju dan dari bumi.*[1] Menurut T.S. Hutaeruk (2007) “ Tujuan utama sistem pembumian adalah untuk mendapatkan tahanan kontak

langsung ke tanah yang cukup kecil”. Untuk mengetahui sejauh mana tahanan kontak ke tanah dapat diperkecil, maka kita perlu rumus-rumus tahanan kontak ke tanah dari masing-masing sistem pembumian.[2] J.M Nahman dan V.B Djorjevic (2007) berpendapat bahwa tahanan elektroda pembumian adalah salah satu parameter penting yang dapat menentukan kenaikan potensial pada peralatan yang terbuat dari metal. Selanjutnya beliau mengatakan bahwa tahanan pembumian dari grid yang ditanam pada kedalaman tertentu tergantung pada lapisan tanah tempat grid itu ditanam. Dalam kasus tanah uniform (homogen), bila kedalaman grid bertambah maka tahanan pembumian menjadi berkurang.[3]

Tadjuddin (2020), dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa tegangan permukaan tanah yang timbul saat terjadi pengaliran arus gangguan ke tanah. Pembumian peralatan merupakan tindakan pengamanan pada bagian-bagian komponen alat-alat listrik pada *switch yard* yang secara normal tidak dialiri arus listrik namun dalam kondisi tidak normal bisa dilalui arus listrik yaitu dengan cara menghubungkan instalasi yang diamankan dengan hantaran netral yang ditanahkan sedemikian rupa sehingga jika terjadi kegagalan isolasi, tegangan sentuh yang tinggi dapat dihindari sampai bekerjanya alat proteksi arus lebih. Sementara itu pembumian netral biasa dilakukan pada pembangkit listrik dan transformator daya pada gardu-gardu induk dan gardu-gardu distribusi. Terkhusus pada pada Gardu Induk, sistem pembumian merupakan perlengkapan yang amat penting untuk menghindari bahaya-bahaya terhadap orang yang sedang berada didalam atau didaerah Gardu Induk tersebut.[4]

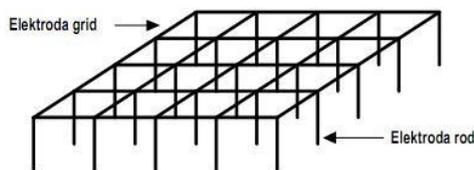
Menurut F.DDawalibi, J.Ma, R.D. Southy berpendapat bahwa performa pentanahan system grid ditinjau dari tahanan pentanahan dan tegangan sentuh, tergantung pada struktur tanah. tahanan pentanahan system grid yang ditanam pada kedalaman tertentu tergantung pada lapisan tanah tempat grid itu ditanam. Untuk tanah uniform bila kedalaman grid bertambah maka tahanan pentanahan semakin berkurang. selain itu dengan sejumlah konduktor dalam grid akan menyebabkan tegangan permukaan tanah semakin kecil dan terdistribusi dengan baik. Menurut F. P Dawalibi, J.M.Ma, R.D Southy berpendapat bahwa performa pentanahan system grid ditinjau dari tahanan pentanahan dan tegangan sentuh, tergantung pada struktur tanah. Tanhanan pentanahan system grid yang ditanam pada kedalaman tertentu tergantung pada lapisan tanah tempat grid itu ditanam. Untuk tanah uniform bila kedalaman grid bertambah maka tahanan pentanahan semakin berkurang. Selain itu dengan sejumlah konduktor dalam grid akan menyebabkan tegangan permukaan tanah semakin kecil dan terdistribusi dengan baik. Pembumian digambarkan sebagai suatu pelaksanaan koneksi atau hubungan listrik yang sengaja dilakukan dari beberapa bagian instalasi listrik ke bumi. Sistem pembumian merupakan rangkaian atau jaringan yang terdiri atas kutub pembumian (elektroda), hantaran penghubung (konduktor) sampai terminal pembumian, yaitu terminal atau titik dimana perangkat dihubungkan. Sistem pembumian ada dua macam yaitu

pembumian sistem (netral) dan pembumian peralatan.[5]

Tujuan dari sistem pembumian berdasarkan IEEE Std 142™-2007 adalah: (a) Membatasi besarnya tegangan terhadap bumi agar berada dalam batasan yang diperbolehkan. (b) Menyediakan jalur bagi aliran arus yang dapat memberikan deteksi terjadinya hubungan yang tidak dikehendaki antara konduktor sistem dan bumi. Deteksi ini akan mengakibatkan beroperasinya peralatan otomatis yang memutuskan suplai tegangan dari konduktor tersebut.

Pembumian *grid* merupakan salah satu sistem pembumian yang banyak digunakan pada gardu induk karena mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan sistem pembumian lainnya. Beberapa keuntungan tersebut antara lain pemasangannya lebih mudah terutama pada daerah berbatu, gradien tegangan pada sistem pembumian *grid* akan lebih rata. Sistem pembumian *grid* dilakukan dengan cara menanamkan batang – batang konduktor sejajar dengan permukaan tanah pada kedalaman tertentu. Batang – batang konduktor tersebut terhubung satu dengan yang lainnya, sehingga membentuk beberapa buah *mesh*. Distribusi tegangan tergantung pada jarak elektroda paralel, makin besar jarak elektroda maka terdistribusi tegangannya makin tidak rata dan makin dekat jarak elektroda paralel maka terdistribusi tegangannya semakin merata[6]

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*. Sistem pembumian *grid-rod* sebenarnya hampir sama dengan sistem *grid*, hanya saja pada sistem ini untuk memperkecil tahanan pentanahan, maka batang konduktor dapat diperbanyak penanamannya. Apabila terjadi arus gangguan ketanah, maka arus gangguan ini akan mengakibatkan naiknya gradient tegangan permukaan tanah. Besarnya tegangan maksimum yang timbul tersebut sebanding dengan tahanan pentanahan[7]



Gambar 1. Pentanahan Sistem *Grid-Rod*

Menurut Buku Pedoman Pemeliharaan Primer GI Kepdir 0520-2.K.Dir.2014 (2014), batasan nilai pembumian pada serandang adalah maksimal 1 Ohm untuk semua level tegangan.[8] Dalam IEEE Std 80-2000, pembumian yang ideal harus memberikan nilai tahanan

pembumian mendekati 0 atau  $\leq 1$  ohm untuk gardu induk bertegangan tinggi. Sebagai perkiraan pertama, sebuah nilai minimum dari tahanan pembumian gardu induk pada tanah yang seragam (*uniform*) untuk lapisan pertama permukaan tanah[1]

Secara teoretis, tahanan dari bumi adalah nol karena luas penampang bumi tak terhingga. Tetapi kenyataannya tidak demikian, artinya tahanan pembumian nilainya tidak nol. Hal ini terutama disebabkan oleh adanya tahanan kontak antara alat pembumian dengan bumi dimana alat tersebut dipasang.

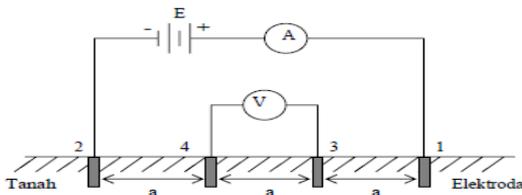
Tahanan pembumian selain ditimbulkan oleh tahanan kontak juga ditimbulkan oleh tahanan sambungan antara alat pembumian dengan kawat penghubungnya. Unsur lain yang menjadi bagian dari tahanan pembumian adalah tahanan dari bumi yang ada di sekitar alat pembumian yang menghambat aliran muatan listrik (arus listrik) yang keluar dari alat pembumian tersebut. Arus listrik yang keluar dari alat pembumian ini menghadapi bagian-bagian tanah yang berbeda tahanan jenisnya. Untuk jenis tanah yang sama, tahanan jenisnya dipengaruhi oleh kedalamannya. Makin dalam letaknya, umumnya makin kecil tahanan jenisnya, karena komposisinya makin padat dan umumnya juga lebih basah. Oleh karena itu, dalam memasang batang pembumian, makin dalam pemasangannya akan makin baik hasilnya dalam artian akan didapat tahanan pembumian yang makin rendah.[6]

Menurut Hutaaruk (2007) untuk mengetahui nilai-nilai tahanan jenis tanah yang akurat harus dilakukan pengukuran secara langsung pada lokasi yang digunakan untuk sistem pembumian karena struktur tanah yang sesungguhnya tidak sesederhana yang diperkirakan, untuk setiap lokasi yang berbeda mempunyai tahanan jenis tanah yang tidak sama.[2]

Tabel 1. Nilai tahanan jenis tanah

Jenis Tanah	Tanah Rawa	Tanah Liat dan Ladang	Pasir Bash	Kerikil Basah	Pasir Keikil Kering	Tanah Basah
Tahanan Jenis Tanah (ohm)	30	100	200	500	1000	3000

Pengukuran tahanan jenis tanah biasanya dilakukan dengan cara metode empat titik (*four electrode method*). Pengukuran tahanan jenis tanah dengan metode ini menggunakan empat buah elektroda, sebuah catu daya (baterai), sebuah *amperemeter* dan sebuah *voltmeter*.

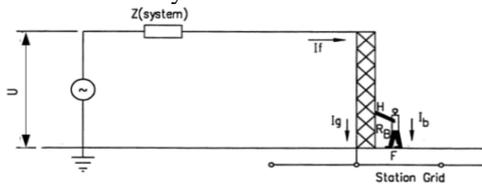


Gambar 2. Rangkaian pengukuran tahanan jenis tanah dengan metode empat titik

### B. Pengaruh Besaran Listrik Terhadap Tubuh Manusia

Dari penyelidikan diketahui bahwa tubuh manusia bersifat penghantar, yang mempunyai impedansi berkisar antara 500 - 100.000 ohm, oleh sebab itu bila terjadi kontak langsung salah satu bagian tubuh dengan bodi peralatan yang menjadi bertegangan karena kegagalan isolasi, maka akan ada arus yang mengalir pada tubuh. Salah satu tindakan pengamanan untuk menghindari dari bahaya akibat sentuhan adalah dengan mengupayakan tahanan peralatan serendahnyanya. Pada hakekatnya perbedaan tegangan selama mengalirnya arus gangguan tanah dapat digambarkan sebagai: tegangan sentuh, tegangan *mesh*, tegangan langkah dan tegangan langkah sebenarnya.[9]

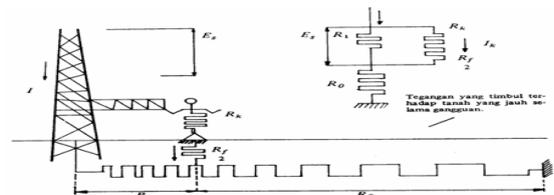
Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat di antara suatu obyek yang disentuh dan suatu titik berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa obyek yang disentuh dihubungkan dengan kisi-kisi pembumian / *grid* pembumian yang berada di bawahnya.



Gambar 3. Tegangan Sentuh

Tegangan *mesh* atau tegangan sentuh maksimum sebenarnya didefinisikan sebagai tegangan peralatan yang diketanahkan terhadap tengah tanah arah yang dibentuk oleh kisi kisi (*center of mesh*) selama gangguan tanah. Tegangan *mesh* ini merupakan tegangan tertinggi yang mungkin timbul sebagai tegangan sentuh dalam system pengamanan gardu induk yang dianggap aman. Nilai tegangan *mesh* tergantung pada faktor geometrik Km, faktor koreksi Ki, Tahanan jenis tanah  $\rho$  dan rata arus per unit dengan panjang sistem pembumian penghantar.[10]

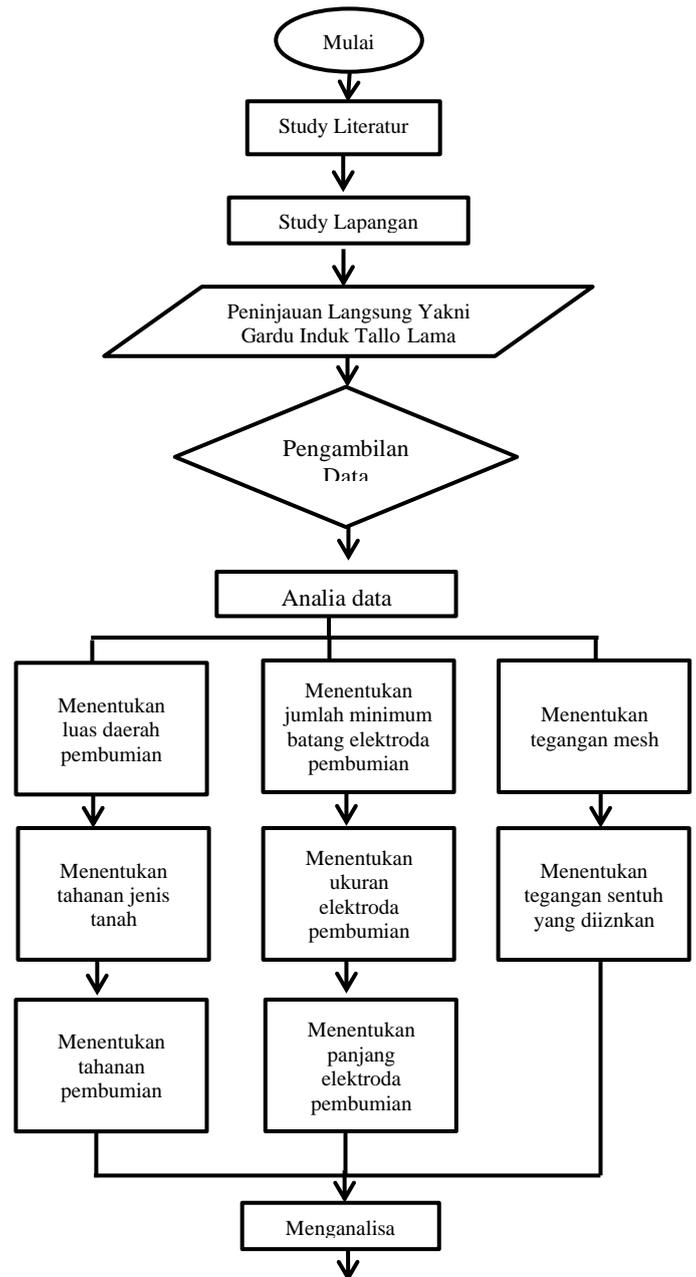
Menurut Thapar, dkk dalam IEEE std 80-2000 , penggunaan empat *grid* dapat efektif pada penghantar *grid* yang diparalel dengan sebutan *n*. Dapat dibentuk menjadi bujur sangkar maupun empat persegi panjang (*rectangular grid*) atau penomoran yang tidak beraturan *grid-grid* pada penghantar paralel yang ekuivalen dengan bujur sangkar *grid*.[1]



Gambar 4. Tegangan sentuh dengan rangkaian ekuivalennya

## III. METODE PENELITIAN

### A. Metode Penelitian





### B. Langkah-Langkah Penelitian

Adapun langkah-langkah yang ditempuh oleh penulis dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### Observasi

Pada proses melakukan observasi, penulis melakukan peninjauan langsung ke tempat yang dijadikan objek penulisan yakni pada Gardu Induk Tallo Lama.

#### Studi Literature

Pada studi literatur, penulis mendapatkan informasi dari berbagai sumber, baik itu dari jurnal-jurnal maupun dari buku-buku yang pembahasannya sesuai dengan judul maupun tujuan dari tugas akhir ini.

#### Wawancara

Wawancara dilakukan dengan cara melakukan tanya jawab dengan narasumber untuk memperoleh informasi yang berkaitan dengan objek yang diteliti. Narasumber harus orang yang benar-benar memahami objek yang dijadikan sebagai topik dari kegiatan wawancara tersebut.

## IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### A. Data Hasil Penelitian

Data hasil pengamatan di Gardu Induk Tallo Lama mengenai jenis tanah, tegangan *mesh* sistem *grid* dan tegangan *mesh* sistem *grid-rod* pada gardu induk.

Tabel 1. Spesifikasi Tanah Gardu Induk Tallo Lama

Kedalaman (m)	Tipe Tanah	Tahanan Jenis Tanah (Ω)
0,5	Tanah Liat ( <i>moist soil</i> )	100
5	Tanah liat ( <i>moist soil</i> )	100
5>	Tanah liat ( <i>moist soil</i> )	100

Pada penelitian ini digunakan data sekunder yaitu data hasil pengukuran yang dilakukan oleh PT. PLN (persero) yang meliputi : Nilai Tahanan jenis tanah. Tanah liat 100 ohm Ukuran daerah pembumian 53 x 39 m

### B. Pembahasan

Luas daerah pembumian gardu induk Tallo Makassar dihitung dengan menggunakan data ukuran daerah pembumian itu sendiri. Gardu induk tersebut mempunyai

ukuran sebagai berikut:

Panjang  $P = 53$  meter dan Lebar  $L = 39$  meter

Jadi luasnya adalah hasil kali antara panjang dengan lebar yaitu:

$$A = P \times L$$

$$A = (53m) \times (39 m)$$

$$A = 2067 m^2$$

Jadi luas daerah pembumian gardu induk Tallo Lama adalah  $2067 m^2$ .

Tahanan jenis tanah Berdasarkan tabel 4.1,  $\rho = 100 \Omega$  dan karena pada permukaan tanahnya berupa tanah liat (*moist soil*), maka nilai tahanan jenis tanahnya dinyatakan sama ( $\rho_s = 100 \Omega$ ). Untuk mengukur ukuran minimum konduktor pembumian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1), dengan ketentuan bahwa tegangan kerja gardu induk Tallo Lama adalah 150 kV, sedangkan waktu gangguan maksimum direncanakan sebesar  $t = 1$  detik dan arus gangguan ke tanah adalah sebesar  $I_g = 1200$  A. Diameter minimum konduktor/elektroda pembumian  $d$  adalah 2,31 mm. Dalam hal ini digunakan diameter konduktor kisi-kisi sebesar  $d = 15$  mm atau 0,015 m. Tegangan sentuh yang diinginkan Berdasarkan IEEE standar 80 bahwa Tegangan Sentuh yang diizinkan untuk lama gangguan 1 detik adalah 626 volt.

Jumlah Minimum Batang Elektroda Pembumian (Rod) 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.

Diketahui :

$$d = 15 \text{ mm}^2$$

$$\delta = 1,75 \times 10^6 \text{ Watt .detik per } m^2 \text{ tiap } ^\circ C.$$

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

$$\rho = 100 \Omega$$

$$t = 1 \text{ s}$$

Dengan menggunakan data-data di atas diperoleh

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

$$i = 3,1414 \times 10^{-5} \times 15 \sqrt{\frac{1,75 \times 10^6 \times 50}{100}}$$

$$i = 47,2 \times 10^{-5} \sqrt{875.000}$$

$$i = 47,2 \times 10^{-5} \times 935,414$$

$$i = 4,415 \times 10$$

$$i = 0,4415 A / cm$$

Jadi kerapatan arus yang diizinkan adalah 0,4415 A/cm. Langkah selanjutnya adalah menentukan panjang batang pembumian.

Untuk menentukan tegangan mesh, digunakan persamaan (2.20 - 2.23). Faktor koreksi ketidakrataan kecepatan arus ( $K_{ii}$ ), Faktor koreksi ketidakrataan kerapatan arus ( $K_i$ ), faktor geometri dari elektroda ( $K_m$ ), serta tegangan mesh ( $E_{mesh}$ ) masing masing dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

Untuk  $D = 6$  m,  $d = 0.015$  m dan  $h = 0.8$  m.

Menentukan faktor koreksi ketidakrataan kecepatan arus ( $K_{ii}$ )

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

$$K_{ii} = \frac{1}{(2.18)^{\frac{2}{18}}}$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(36)^{0,111}}$$

$$K_{ii} = 0,67$$

Menentukan faktor koreksi ketidakrataan kerapatan arus ( $K_i$ )

$$K_i = 0,65 + 1,72n$$

$$K_i = 2,02$$

Menentukan faktor geometri dari elektroda ( $K_m$ )

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

$$K_m = \frac{1}{2.3,14} \left[ L_n \left( \frac{6^2}{16.0,8.0,015} + \frac{(6+2.0,8)^2}{8.6.0,015} - \frac{0,8}{4.0,015} \right) + \frac{0,672}{1,341} L_n \frac{8}{3,14(2.18-1)} \right]$$

$$K_m = \frac{1}{6,28} \left[ L_n \left( \frac{36}{0,196} + \frac{(6+1,6)^2}{0,72} - \frac{0,8}{0,06} \right) + 0,501 \cdot L_n \frac{8}{3,14(36-1)} \right]$$

$$K_m = 0,159 \left[ L_n \left( 183,67 + \frac{(7,6)^2}{0,72} - 13,33 \right) + 0,501 \cdot L_n \frac{8}{3,14(35)} \right]$$

$$K_m = 0,159 \left[ L_n \left( 183,67 + \frac{57,76}{0,72} - 13,33 \right) + 0,501 \cdot L_n \frac{8}{109,9} \right]$$

$$K_m = 0,159 [L_n(183,67 + 80,22 - 13,33) + 0,501 \cdot L_n 0,072]$$

$$K_m = 0,159 [5,52 + 0,501 \cdot (-2,63)]$$

$$K_m = 0,159 [5,52 - 1,31]$$

$$K_m = 0,159 [4,21]$$

$$K_m = 0,669$$

$$K_m = 0,67$$

Menentukan tegangan mesh ( $E_{mesh}$ )

$$E_{mesh} = K_m K_i \rho \frac{I_g}{L}$$

$$E_{mesh} = 0,67 \times 2,02 \times 100 \times \frac{10000}{1012}$$

$$E_{mesh} = \frac{1353400}{1012}$$

$$E_{mesh} = 1337,35 \text{ Volt}$$

Perhitungan dilakukan dengan melakukan pengurangan jarak konduktor paralel D secara bertahap, maksimal perubahan 1 meter, dan hasilnya adalah sebagai berikut

Tabel 2. Tegangan mesh sistem grid untuk berbagai jarak D,  $E_{mesh} = f(D)$

D (m)	N	L (m)	E mesh (volt)
6	9	750	1468,49
5	11	895	1166,43
4,5	12	987	963,6
4,25	13	1079	895,41
4	13	1132	820,64
3,8	13	1171	767,33
3,7	14	1224	720,58
3,6	14	1316	641,12
3,5	15	1368	581,45
3	16	1422	521,72
2,5	20	1790	318,82
2	25	2211	128,83
1,8	27	2488	64,75

Tegangan mesh yang memenuhi syarat, mulai pada saat jarak konduktor paralel  $D = 3,5$  meter dengan tegangan mesh 581,45 volt dan panjang total konduktor pembumian 1368 meter. Semakin kecil jarak konduktor paralel D semakin banyak jumlah mesh yang terbentuk dan semakin panjang konduktor pembumian yang dibutuhkan dan juga semakin kecil tegangan mesh. Dengan semakin panjangnya konduktor pembumian tersebut maka tahanan total menjadi semakin kecil sehingga tegangan mesh juga menjadi semakin kecil. Hal ini dapat dilihat pada  $D = 6$  meter,  $n = 9$ ,  $L = 750$  meter maka  $E_{mesh} = 1468,49$  volt sedangkan pada saat jarak  $D = 3,5$  meter  $n = 15$ ,  $L = 1368$  meter maka  $E_{mesh} = 581,45$  volt (memenuhi syarat).

Tabel 3. Tegangan mesh sistem grid-rod untuk berbagai jarak D,  $E_{mesh} = f(D)$

D (m)	N	L (m)	E mesh (volt)
6	8	1012	1337,35
5	9	1157	867,78

4,5	12	1341	741,16
4,25	13	1341	720,47
4	13	1394	667,55
3,8	4	1433	626,87
3,7	14	1486	583,53
3,6	14	1486	582,44
3,5	15	1249	534,6
3	17	1578	461,18
2,5	20	2052	272,88
2	25	2473	115,18
1,8	27	2710	59,4

Tegangan *mesh* yang memenuhi syarat, mulai pada saat jarak konduktor paralel  $D = 3.7$  meter dengan tegangan *mesh* 583,53 volt dan panjang total konduktor pembumian 1486 meter dengan elektroda rod sebanyak 65 batang. Semakin kecil jarak konduktor paralel  $D$  semakin banyak jumlah mesh yang terbentuk dan semakin panjang konduktor pembumian yang dibutuhkan dan juga semakin kecil tegangan *mesh*. Dengan semakin panjangnya konduktor pembumian tersebut maka tahanan total menjadi semakin kecil sehingga tegangan *mesh* juga menjadi semakin kecil. Hal ini dapat dilihat pada  $D = 6$  meter,  $n = 8$ ,  $L = 1012$  meter maka  $E_{mesh} = 1337,35$  volt sedangkan pada saat jarak  $D = 3,7$  meter  $n = 14$ ,  $L = 1486$  meter maka  $E_{mesh} = 583,53$  volt (memenuhi syarat).

Untuk menghitung tahanan pembumian digunakan persamaan (2.9), terlebih dahulu ditentukan *length of conductor* ( $L_T$ ) menggunakan persamaan (2.10), (2.11) dan (2.12) seperti yang dijelaskan sebelumnya.

Tabel 4. Tahanan pembumian untuk berbagai jarak  $D$ ,  $E_{mesh} = f(D)$  untuk sistem *grid-rod*.

D (m)	A ( $m^2$ )	$L_T$ (m)	p ( $\Omega$ )	h (m)	$R_g$ ( $\Omega$ )
6	2067	750	100	0,8	1,077
5	2067	895	100	0,8	1,055
4,5	2067	987	100	0,8	1,045
4,25	2067	1079	100	0,8	1,036
4	2067	1132	100	0,8	1,032
3,8	2067	1171	100	0,8	1,029
3,7	2067	1224	100	0,8	1,025
3,6	2067	1316	100	0,8	1,019
3,5	2067	1368	100	0,8	1,017
3	2067	1422	100	0,8	1,014

2,5	2067	1790	100	0,8	0,999
2	2067	2211	100	0,8	0,989
1,8	2067	2488	100	0,8	0,984

Semua tahanan pembumian memenuhi syarat karena semua nilai tahanan pembumiannya mendekati nilai  $1 \Omega$ , mulai pada saat jarak konduktor paralel  $D = 6$  meter dengan tahanan pembumian sebesar  $1,077 \Omega$  dan panjang total konduktor pembumian 750 meter. Semakin kecil jarak konduktor paralel  $D$  semakin banyak jumlah mesh yang terbentuk dan semakin panjang konduktor pembumian yang dibutuhkan dan juga semakin kecil nilai tahanan pembumian. Dengan semakin panjangnya konduktor pembumian tersebut maka nilai tahanan pembumian menjadi semakin kecil. Hal ini dapat dilihat pada  $D = 6$  meter,  $A = 2067$  meter persegi,  $L_T = 750$  meter dan  $h = 0,8$  meter, maka  $R_g = 1,077 \Omega$  sedangkan pada saat jarak  $D = 3,5$  meter,  $A = 2067$  meter persegi,  $L_T = 1368$  meter dan  $h = 0,8$  meter, maka  $R_g = 1,017 \Omega$  (memenuhi syarat).

Tabel 5. Tahanan pembumian untuk berbagai jarak  $D$ ,  $E_{mesh} = f(D)$  untuk sistem *grid*.

D (m)	A ( $m^2$ )	$L_T$ (m)	( $\Omega$ )	h (m)	$R_g$ ( $\Omega$ )
6	2067	1012	100	0,8	1,042
5	2067	1157	100	0,8	1,03
4,5	2067	1341	100	0,8	1,018
4,25	2067	1341	100	0,8	1,018
4	2067	1394	100	0,8	1,015
3,8	2067	1433	100	0,8	1,013
3,7	2067	1486	100	0,8	1,011
3,6	2067	1486	100	0,8	1,011
3,5	2067	1549	100	0,8	1,008
3	2067	1578	100	0,8	1,007
2,5	2067	2052	100	0,8	0,992
2	2067	2473	100	0,8	0,984
1,8	2067	2710	100	0,8	0,98

Semua tahanan pembumian memenuhi syarat karena semua nilai tahanan pembumiannya mendekati nilai  $1 \Omega$ , mulai pada saat jarak konduktor paralel  $D = 6$  meter dengan tahanan pembumian sebesar  $1,042 \Omega$  dan panjang total konduktor pembumian 1012 meter. Semakin kecil jarak konduktor paralel  $D$  semakin banyak jumlah mesh yang terbentuk dan semakin panjang konduktor pembumian yang dibutuhkan dan juga semakin kecil nilai tahanan pembumian. Dengan semakin panjangnya konduktor pembumian tersebut maka nilai tahanan pembumian menjadi semakin kecil. Hal ini dapat dilihat pada  $D = 6$  meter,  $A = 2067$  meter persegi,  $L_T = 1012$  meter dan  $h = 0,8$  meter, maka  $R_g = 1,042 \Omega$  sedangkan pada saat jarak  $D = 3,7$  meter,  $A = 2067$  meter persegi,  $L_T = 1486$  meter dan  $h = 0,8$  meter, maka  $R_g = 1,011 \Omega$

(memenuhi syarat).

## V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat di ambil dari proses analisis adalah sebagai berikut:

1. Pada sistem pembumian *grid* dengan jarak konduktor paralel  $D = 3$  meter dan panjang total konduktor pembumian 1422 meter memiliki tegangan *mesh* sebesar 521,72 volt, sedangkan pada sistem pembumian *grid-rod* dengan jarak konduktor paralel  $D = 3$  meter dan panjang total konduktor pembumian 1578 meter dengan elektroda *rod* sebanyak 65 batang memiliki tegangan *mesh* sebesar 461,18 volt.
2. Nilai tahanan pembumian pada sistem pembumian *grid* dengan jarak konduktor paralel  $D = 3$  meter dan panjang total konduktor pembumian 1422 meter adalah 1,014  $\Omega$ , sedangkan nilai tahanan pembumian pada sistem pembumian *grid-rod* dengan jarak konduktor paralel  $D = 3$  meter dan panjang total konduktor pembumian 1578 meter dengan elektroda *rod* sebanyak 65 batang adalah 1,007  $\Omega$ .

## SARAN

Untuk sistem pembumian gardu induk dengan spesifikasi tanah berupa tanah liat sebaiknya menggunakan sistem pembumian *grid-rod*.

## REFERENSI

- [1] IEEE Std 80-2020. 2020. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York USA:
- [2] Hutauruk, TS. Ir.M.E.E.2020. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga. Jakarta: Erlangga.
- [3] Nehman, J.M. dan Djordjevic, V.B. (2020). Resistance to Ground of Combined Grid-Multiple Rods Electrodes.
- [4] Tadjuddin 2021. Analisis Pengaruh Tahanan Jenis Tanah Terhadap Tahanan Pembumian dan Tegangan Permukaan Tanah pada Struktur Tanah Dua Lapis: Makassa
- [5] J.Ma,S.Member,F.P.Dawalibi,S.Member,andR.D.southy, "Effects of the Chnes in the Dsignan and Analysis of
- [6] IEEE Std 142-2020. 2020. Grounding of Industrial and Comercial Power System. New York USA:
- [7] Chow, Y.L., Elsherbiny, M.M., dan Salama, M.M.A. (2020). Surface Voltages and Resistance of Grounding Systems of Grid and Rods in Two-Layer Earth by The Rapid Galerkin's Moment Method.
- [8] Buku Pedoman Pemeliharaan Primer GI Kepdir 0520-2.kk.DIR>22014
- [9] PUIL 2000. Badan Standarisasi Nasional.
- [10] Artono Arismunandar, DR.M.A.Sc. 2020. Teknik Tenaga Listrik. Jakarta: Pradnya Paramita.