

# Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling Dengan Konstruksi *Grid* (Kisi-kisi)

Agus Pranoto, Hans Tumaliang, Glanny M.Ch. Mangindaan  
Teknik Elektro Universitas Sam Ratulangi Manado, Jl. Kampus Bahu-Unsrat Manado, 95115  
Email: se.aguest17@gmail.com, hanstumaliang@gmail.com, glanny\_m@unsrat.ac.id

**Abstract**— The grounding system of the Teling substation is one of the most important parts in the delivery of electrical quality and continuously. Due to the Teling substation must work well together by using a large disturbance that result in the computer equipment that is the main cause of damage to the substation equipment. This is due to the ineffectiveness of the grounding system, which is due to the earth resistance greater than the standard IEEE Std 2000-80 limit of 0-1 ohm. Therefore it is necessary to do an analysis of whether the grounding system of substation Teling still meet the above favorable standards.

In this final project, the system analysis is done by using the grid construction method by considering the mesh voltage, voltage, maximum grid, GPR, and soil resistivity. From the research result, it is found that the grounding system of the grounding system resistance of substation equipment that meets the standard is  $0.10 \Omega$  to  $0.8 \Omega$ , compared with the calculation of the grid of groundless grid of ground resistance grid ( $R_g = 0.47 \Omega$ ) and earthing grid with grounding rod ( $R_g = 0.18 \Omega$ ). The maximum grid current of the ground substation is capable of delivering power to the ground up to 9307.8 A, with a grid size of conductor 38.72 mm<sup>2</sup>

**Keywords:** GPR, Ground, Grid, Substation, Step Voltage, Touch Voltage

**Abstrak**— Sistem pentanahan pada gardu induk Teling adalah salah satu dari bagian penting dalam penyaluran kualitas listrik dan secara kontinyu. Dikarenakan gardu induk Teling harus bekerja sama dengan baik dengan menggunakan gangguan yang besar yang berakibat pada peralatan komputer yang menjadi penyebab utama kerusakan pada peralatan gardu induk. Hal ini diakibatkan oleh tidak bekerjanya sistem pentanahan dengan baik, yaitu akibat resistansi pentanahan lebih besar dari batasan standar yaitu 0-1 ohm. Oleh karena itu perlu dilakukan satu analisis apakah sistem pentanahan gardu induk teling masih memenuhi standar yang menguntungkan diatas.

Dalam tugas akhir ini, dilakukan analisis sistem secara khusus gardu induk Teling menggunakan metode konstruksi grid dengan mempertimbangkan tegangan mesh, tegangan, grid maksimum, GPR, dan resistivitas tanah. Dari hasil penelitian yang diperoleh adalah sistem pentanahan nilai resistansi sistem pentanahan peralatan gardu induk yang memenuhi standar yaitu  $0,10 \Omega$  sampai  $0,8 \Omega$ , dibandingkan dengan hasil perhitungan yaitu grid pentanahan tanpa batang pentanahan grid resistansi ( $R_g = 0,47 \Omega$ ) dan pentanahan grid dengan batang pentanahan ( $R_g = 0,18 \Omega$ ). Arus grid maksimum pentanahan gardu induk teling yang mampu mengalirkan tenaga ke tanah hingga 9307,8 A, dengan ukuran grid konduktor 38,72 mm<sup>2</sup>

**Kata Kunci:** GPR, Pentanahan, Grid, Gardu Induk, Tegangan langkah, Tegangan sentuh

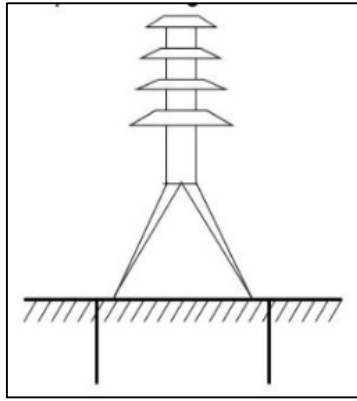
## I. PENDAHULUAN

Gardu induk merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik yang berpotensi mengalami gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir, yaitu tegangan impuls petir, tegangan impuls hubung buka, dan tegangan impuls petir terpotong dan arus gangguan. Tegangan impuls dan arus gangguan yang ditimbulkan dapat merusak fungsi peralatan sistem tenaga listrik, sehingga tegangan impuls dan arus bocor yang ditimbulkan harus dialirkan ke bumi untuk mendapatkan batas keamanan peralatan sistem tenaga listrik dan tubuh manusia disekitar area gardu induk.

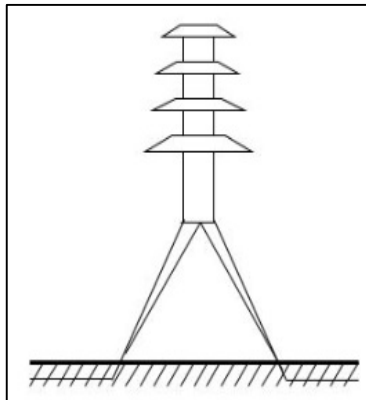
Sistem pentanahan (*grounding system*) menjadi bagian dari sistem tenaga listrik yang memiliki fungsi menyetanahkan apabila terjadi muatan tegangan atau arus lebih sehingga dapat meminimalisir gangguan yang ditimbulkan. Untuk nilai pentanahan yang ideal harus memenuhi syarat dengan nilai R mendekati nilai 0 atau  $\leq 1$  Ohm. Tegangan dan arus gangguan diatas tidak mengalir kedalam tanah diakibatkan karena kegagalan isolasi peralatan dan nilai tahanan pentanahan yang cukup besar.

Oleh karena sistem pentanahan merupakan peralatan untuk membatasi tegangan antara alat – alat yang tidak dilalui listrik dan diantara bagian alat – alat ini dengan tanah sampai didapatkan harga tertentu. Begitu pentingnya sistem pentanahan untuk mengamankan peralatan-peralatan pada gardu induk yang memiliki fungsi memikul beban tegangan dan arus yang sangat tinggi secara kontinyu. Peralatan tersebut juga harus mampu menahan arus gangguan, tegangan impuls petir, tegangan impuls hubung buka, dan tegangan impuls petir terpotong dalam hitungan beberapa sekon.

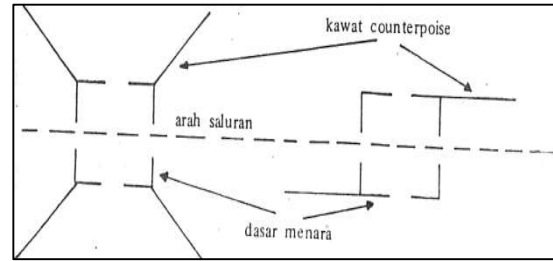
Pentanahan gardu induk awalnya dilakukan dengan cara menanamkan batang konduktor secara vertikal terhadap permukaan tanah. Hal ini tidak efektif dikarenakan saat muncul arus dan tegangan tidak terdistribusi sempurna sehingga menyebabkan batang konduktor rusak akibat tidak dapat menahan arus dan tegangan yang sangat tinggi. Oleh karena itu dibutuhkan desain pentanahan gardu induk Teling horizontal terhadap permukaan tanah dan dihubungkan dengan konduktor yang lain membentuk suatu jaring – jaring yang kemudian disebut sistem pentanahan jaringan (*grid*).



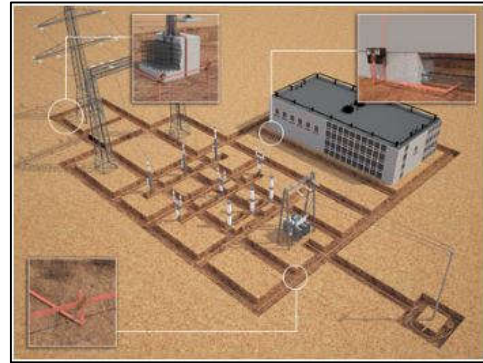
Gambar 1 Pentanahan dengan *driven ground*



Gambar 2 Pentanahan dengan *counterpoise*



Gambar 3 Pentanahan menara dengan counterpoise



Gambar 4 Pentanahan *Grid / mesh* pada gardu induk

Dari permasalahan yang diatas sehingga penulis mengambil judul “Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling Dengan Konstruksi *Grid* (Kisi-kisi)”.

A. *Sistem Pentanahan (Grounding System)*

Sistem pentanahan adalah sistem hubungan penghantar yang menghubungkan sistem, peralatan dan instalasi dengan bumi/tanah sehingga dapat mengamankan manusia dari sengatan listrik, dan mengamankan komponen-komponen instalasi dari bahaya tegangan/ arus abnormal. Oleh karena itu, sistem pentanahan menjadi bagian esensial dari sistem tenaga listrik.

B. *Sistem Pentanahan Peralatan (Equipment Grounding System)*

Sistem pentanahan peralatan adalah menghubungkan badan atau rangka peralatan listrik (motor, generator, transformator, pemutus daya, dan bagian-bagian logam lainnya yang pada keadaan normal tidak dialiri arus) dengan tanah.

Tahanan pentanahan adalah besarnya tahanan pada kontak/hubung antara masa (*body*) dengan tanah. Faktor – faktor yang mempengaruhi besarnya tahanan pentanahan yaitu :

- 1) Resistivitas (*resistivitas*) tanah
- 2) Panjang elektroda pentanahan
- 3) Luas penampang elektroda pentanahan

C. *Metode Sistem Pentanahan*

Ada beberapa metode sistem pentanahan yaitu dijelaskan sebagai berikut :

1) *Pentanahan dengan driven ground*

Pentanahan dengan *driven ground* adalah pentanahan yang dilakukan dengan cara menancapkan batang elektroda ke tanah, lihat gambar 1.

2) *Pentanahan dengan counterpoise*

Pentanahan dengan *counterpoise* adalah pentanahan yang dilakukan dengan cara menanam kawat elektroda sejajar atau radial, beberapa cm dibawah tanah (30 cm – 90 cm), lihat gambar 2.

Pentanahan counter poise biasanya digunakan apabila resistansi tanah terlalu tinggi dan tidak dapat dikurangi dengan cara pentanahan driven ground, biasanya karena resistivitas tanah terlalu tinggi, lihat gambar 3.

3) *Pentanahan dengan mesh atau grid*

Pentanahan dengan mesh atau grid adalah cara pentanahan dengan jalan memasang kawat konduktor elektroda membujur dan melintang dibawah tanah, yang satu sama lain dihubungkan disetiap tempat sehingga membentuk jala (*mesh/grid*).

Sistem pentanahan mesh/grid biasanya dipasang di gardu induk dengan tujuan mendapatkan nilai resistansi tanah yang sangat kecil (kurang dari 1 Ω), lihat gambar 4.

D. Konduktor

Setiap bagian sistem grounding, termasuk konduktor grid, koneksi, dan semua elektroda primer, harus didesain sedemikian rupa sehingga untuk umur desain instalasi yang diharapkan, elemen akan :

- 1) Memiliki konduktivitas yang cukup
- 2) Sekering dapat menahan dan mekanis dengan kombinasi besaran gangguan dan durasinya
- 3) Kemampuan mekanik yang tinggi.
- 4) Mampu mempertahankan fungsinya bahkan saat terkena korosi.

E. Ukuran Konduktor

Ukuran konduktor menjadi pertimbangan dalam menentukan kualitas dari besarnya arus gangguan yang didistribusikan ke tanah dapat dilihat dipersamaan (1).

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

Dimana :

- I = Arus rms (kA)
- $A_{mm^2}$  = Penampang konduktor (mm<sup>2</sup>)
- $T_m$  = Suhu maksimum yang diijinkan (°C)
- $T_a$  = Suhu sekitar (°C)
- $T_r$  = Suhu referensi untuk konstanta material (°C)
- $\alpha_0$  = Koefisien resistivitas termal pada 0°C (1/°C)
- $\alpha_r$  = Koefisien resistivitas termal pada suhu referensi  $T_r$  (1 / °C)
- $\rho_r$  = Resistivitas konduktor tanah pada suhu referensi  $T_r$  (μΩ-cm)
- $K_o$  =  $1 / \alpha_0$  atau  $(1 / \alpha_r) - T_r$  (°C)
- $T_c$  = Durasi arus (s)
- TCAP = Kapasitas termal per satuan volume dari

Tabel 1, dalam J / (cm<sup>3</sup> °C)

Rumus dalam unit bahasa Inggris dapat disederhanakan persamaan (2) berikut:

$$A_{kcmil} = I \cdot K_f \sqrt{t_c} \quad (2)$$

Dimana :

- $A_{kcmil}$  = Luas bidang konduktor (kcmil)
- I = Arus gangguan rms (kA)
- $t_c$  = Durasi saat ini (s)
- $K_f$  = Konstanta dari untuk material pada berbagai nilai  $T_m$  (suhu peleburan atau suhu

konduktor terbatas berdasarkan dan menggunakan suhu lingkungan ( $T_a$ ) 40 °C

F. Rentang Arus yang dapat ditoleransi

Efek fisiologis yang paling umum dari arus listrik pada tubuh, yang dinyatakan dalam rangka meningkatkan besaran arus, adalah persepsi ambang batas, kontraksi otot, ketidaksadaran, fibrilasi jantung, penyumbatan saraf respirasi, dan pembakaran. Arus nonfibrilasi magnitudo  $I_B$  pada durasi berkisar antara 0,03-3,0 s terkait dengan energi yang diserap oleh tubuh seperti yang dijelaskan. Dengan persamaan (3) berikut :

$$S_B = (I_B)^2 \times t_s \quad (3)$$

Dimana :

- $I_B$  = rms besarnya arus yang melalui tubuh (A)
- $t_s$  = Durasi dari paparan arus (s)
- $S_B$  = Konstanta empiris yang berhubungan dengan energi sengatan listrik yang di toleransi oleh persen tertentu dari populasi tertentu

G. Batas Arus yang di Toleransi

Besar dan durasi arus yang dilakukan melalui tubuh manusia pada 50 Hz atau 60 Hz harus kurang dari nilai yang dapat menyebabkan fibrilasi ventrikel jantung.

Dimana, selain persyaratan yang sebelumnya didefinisikan untuk persamaan (5) :

$$k = \sqrt{S_B}$$

Dalziel menemukan bahwa energi kejutan yang bisa bertahan dengan berat sekitar 50 kg rumus untuk arus tubuh yang diijinkan menjadi persamaan (5) :

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \text{ untuk berat badan 50 kg} \quad (5)$$

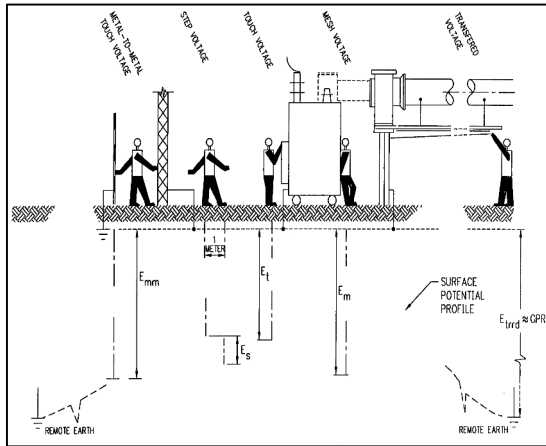
Dimana Persamaan (3) didasarkan, menghasilkan nilai alternatif  $k = 0,157$  dan  $S_B = 0,0246$  yang berlaku untuk orang dengan berat 70 kg (155 lb). Demikian, dapat dilihat pada persamaan (6) :

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \text{ untuk berat badan 70 kg} \quad (6)$$

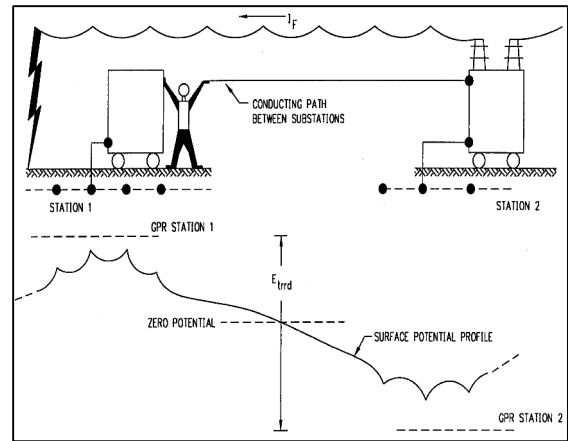
H. Pengaruh Lapisan Tipis bahan Permukaan

Lapisan bahan resistivitas tinggi 0,08-0,15 m (3-6 in), seperti kerikil, sering menyebar di permukaan bumi di atas grid tanah untuk meningkatkan resistansi kontak antara tanah dan kaki manusia di gardu induk. Kedalaman material permukaan yang relatif rendah, dibandingkan dengan jari-jari kaki yang setara, menghalangi asumsi resistivitas seragam pada arah vertikal saat menghitung resistansi dasar kaki.

Persamaan resistansi tanah pada bahan permukaan :



Gambar 5 Keadaan dasar Kejut



Gambar 6 Keadaan tipikal potensi perpindahan yang diperluas

$$R_f = \left[ \frac{\rho_s}{4b} \right] C_s \quad (8)$$

$$C_s = 1 + \frac{16b}{\rho_s} \sum_{n=1}^{\infty} K^n R_m(2nh_s) \quad (9)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (10)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot L_r \cdot R}{\ln\left(\frac{8 \cdot L_r}{d}\right) - 1} \quad (12)$$

Dimana :

C<sub>s</sub> = Faktor derating lapisan permukaan

K = Faktor refleksi antara resistivitas material yang berbeda

ρ<sub>s</sub> = Resistivitas bahan permukaan ( Ω.m )

ρ = Resistivitas bumi di bawah material permukaan ( Ω.m )

h<sub>s</sub> = Ketebalan material permukaan ( m )

b = Jari-jari cakram logam melingkar yang mewakili kaki ( m )

R<sub>m(2nhs)</sub> = Resistansi timbal balik antara dua lempeng koaksial serupa, paralel, dipisahkan oleh jarak (2nhs), dalam medium resistivitas tak terbatas, ρ<sub>s</sub>, ( Ω.m )

I. *Kriteria Toleransi Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah*

Dapat dilihat pada gambar 5 dan gambar 6 bahwa berbagai bentuk keadaan kejut terhadap pentanahan dalam gardu induk. Yaitu gambar 5 adalah keadaan dasar kejut dan gambar 6 adalah keadaan tipikal potensi perpindahan yang diperluas.

Untuk Tegangan langkah limitnya persamaan (12) dan Persamaan (13) adalah :

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{untuk berat badan 50 kg}) \quad (12)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{untuk berat badan 70 kg}) \quad (13)$$

Begitu pula dengan batas tegangan sentuh dengan persamaan (14) dan persamaan (15) :

$$E_{step50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{untuk berat badan 50 kg}) \quad (14)$$

$$E_{step70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{untuk berat badan 70 kg}) \quad (15)$$

Dimana :

E<sub>step</sub> = Tegangan step (V)

E<sub>touch</sub> = Tegangan sentuh (V)

C<sub>s</sub> = Faktor derating lapisan permukaan

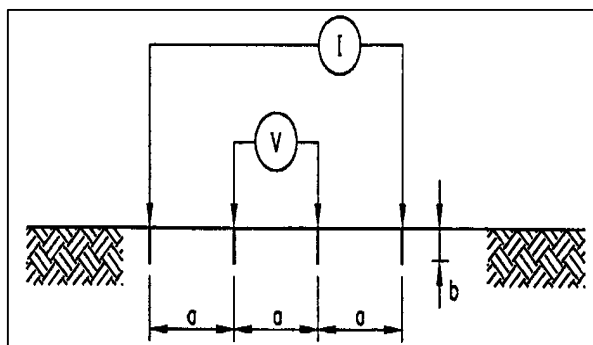
r<sub>s</sub> = Resistivitas material permukaan ( Ω.m )

t<sub>s</sub> = Durasi arus bocor (s)

Jika tidak ada pelindung lapisan permukaan yang digunakan, maka C<sub>s</sub> = 1 dan ρ<sub>s</sub> = ρ.

J. *Pengukuran Resistivitas Tanah*

Estimasi berdasarkan klasifikasi tanah hanya menghasilkan perkiraan kasar resistivitas. Oleh karena itu, pengukuran resistivitas sebenarnya sangat penting dan harus dilakukan di sejumlah tempat lokasi gardu induk dimana, tanah dapat memiliki resistivitas seragam di seluruh area dan kedalaman yang cukup baik ditemukan. Biasanya, ada beberapa lapisan, masing-masing memiliki resistivitas yang berbeda, lihat tabel I.



Gambar 7 Pengukuran resistivitas metode empat pin wenner

Metode *Wenner* adalah metode empat pin *Wenner*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 7 adalah teknik pengukuran resistivitas tanah yang paling umum digunakan. Singkatnya, empat probe ditanamkan ke bumi sepanjang garis lurus, pada jarak yang sama terpisah, dengan kedalaman *b*. Tegangan antara dua elektroda dalam (potensial) kemudian diukur dan dibagi oleh arus antara dua elektor terluar (arus) untuk memberi nilai ketahanan *R*.

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \tag{16}$$

Dimana :

- $\rho_a$  : resistivitas nyata dari tanah ( $\Omega \cdot m$ )
- R* : resistansi yang diukur ( $\Omega$ )
- a* : jarak antara elektroda yang berdekatan (m)
- b* : kedalaman elektroda (m)

Jika kedalam *b* kecil persamaan (16) dapat disederhanakan menjadi persamaan (17) :

$$\rho_a = 2\pi a R \tag{17}$$

Arus cenderung mengalir di dekat permukaan untuk jarak probe kecil, sementara lebih banyak arus menembus tanah yang lebih dalam untuk jarak yang jauh. Jadi, biasanya pendekatan yang masuk akal untuk mengasumsikan bahwa resistivitas yang diukur untuk jarak probe tertentu menunjukkan resistivitas nyata dari tanah sampai kedalaman resistivitas lapisan tanah bila kontras tidak berlebihan. Persamaan (16) dan Persamaan (17) dapat digunakan untuk menentukan resistivitas nyata  $\rho_a$  pada kedalaman *a*.

**K. Resistansi Grid rod**

Resistansi tanah antara *grid* dan *rod grid* pada persamaan (18) :

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln\left(\frac{2L_c}{L_r}\right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \tag{18}$$

Resistansi ground gabungan dari *grid* dan *rod* bed akan lebih rendah dari resistansi *ground* dari kedua komponen saja, namun tetap lebih tinggi dari pada kombinasi paralel.

TABEL I RANGE RESISTIVITAS TANAH

| Jenis Tanah ( <i>Type of earth</i> )            | Average Resistivity ( $\Omega \cdot m$ ) |
|---|--|
| Tanah Organik Basah ( <i>Wet organic soil</i> ) | 10                                       |
| Tanah Lembab ( <i>Moist soil</i> )              | $10^2$                                   |
| Tanah Kering ( <i>Dry soil</i> )                | $10^3$                                   |
| Batuan dasar ( <i>Bedrock</i> )                 | $10^4$                                   |

Sumber : PUIL 2000, 3.18.3.1

**L. Arus grid maksimum dan faktor pembagi arus gangguan**

Faktor yang merupakan kebalikan dari perbandingan arus gangguan simetris terhadap bagian arus yang mengalir di antara *grid grounding* dan bumi di sekitarnya dapat dilihat pada persamaan (19) :

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \tag{19}$$

Dimana :

- S<sub>f</sub>* : Faktor pembagi arus gangguan
- I<sub>g</sub>* : Arus grid simetris rms (A)
- I<sub>0</sub>* : Arus gangguan urutan nol (A)

Nilai desain arus grid maksimum, yang didefinisikan dengan persamaan (20) :

$$I_G = D_f \times I_g \tag{20}$$

Dimana :

- I<sub>G</sub>* = Arus grid maksimum (A)
- D<sub>f</sub>* = Faktor penurunan untuk seluruh durasi gangguan *t<sub>f</sub>*, (s)
- I<sub>g</sub>* = Arus grid simetris rms (A)

$$GPR = I_G \cdot R_g \tag{21}$$

**M. Tegangan Mesh**

Nilai tegangan mesh diperoleh sebagai produk dari faktor geometris, *K<sub>m</sub>*; Faktor korektif, *K<sub>i</sub>*, yang menjelaskan beberapa gangguan yang diperkenalkan oleh asumsi yang dibuat dalam memperoleh *K<sub>m</sub>*; Resistivitas tanah  $\rho$  ; Dan rata-rata arus per unit panjang pengeboran efektif dari *grounding system conductor* (*I<sub>G</sub>* / *L<sub>M</sub>*) dengan persamaan (22) :

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \tag{22}$$

**N. Tegangan Langkah**

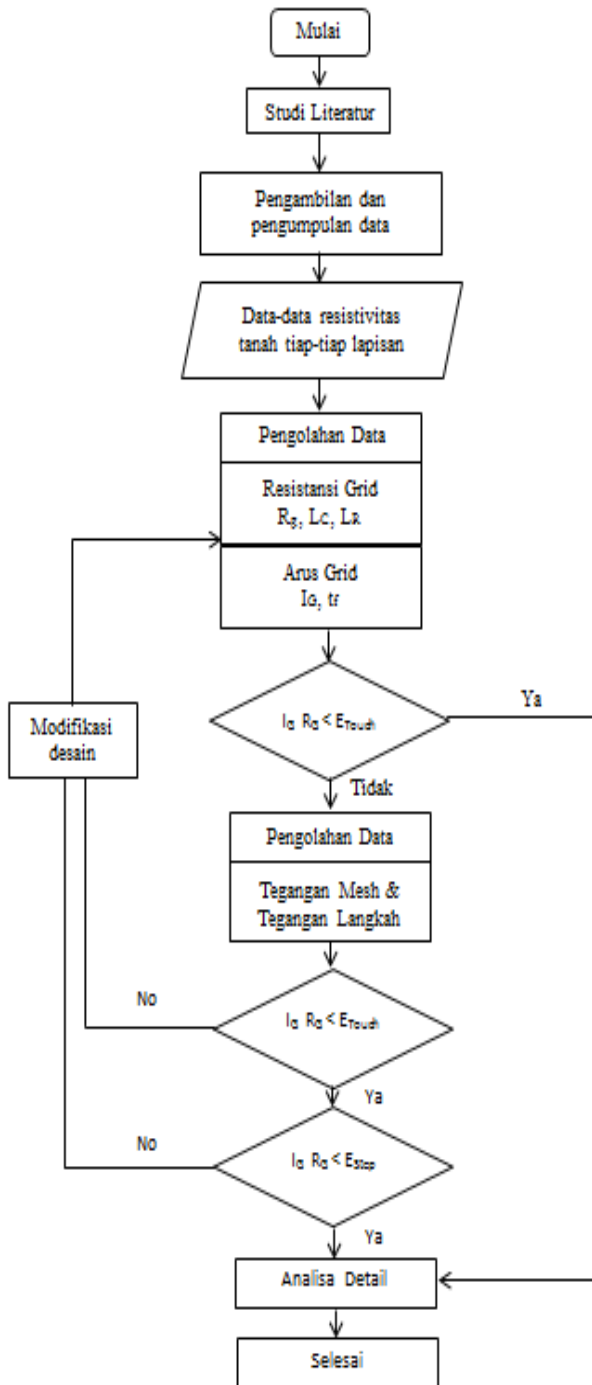
Nilai tegangan langkah diperoleh sebagai hasil dari faktor geometris (*K<sub>s</sub>*); Faktor korektif (*K<sub>i</sub>*); Resistivitas tanah ( $\rho$ ); dan arus rata-rata per unit konduktor *grounding ground* terkubur (*I<sub>G</sub>* / *L<sub>S</sub>*) dengan persamaan (23) :

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \tag{23}$$

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan tahapan-tahapan yang dikaji dengan melakukan pertimbangan studi literatur, pengambilan data, pengolahan data, proses eksekusi / penentuan keputusan, perbaikan atau modifikasi dan eksekusi akhir

Adapun tahapan-tahapan penelitian “Analisa Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling dengan Konstruksi *Grid* (kisi-kisi)” dapat dilihat pada gambar 7 Flowchart Penelitian.



Gambar 7 Flowchart Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan pentanahan grid gardu induk dihitung dengan 2 mode yaitu perhitungan pentanahan grid tanpa batang pentanahan dan perhitungan pentanahan grid dengan batang pentanahan.

A. Perhitungan pentanahan grid tanpa batang pentanahan (*ground rod*).

1) Resistivitas tanah

Hasil pengukuran resistansi tanah pada lokasi sekitar gardu induk teling, sehingga resistivitas tanah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (12) berikut :

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L_r \cdot R}{\ln\left(\frac{8 \cdot L_r}{d}\right) - 1} \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 9,8}{\ln\left(\frac{8 \cdot 2}{0,1589}\right) - 1} \\ &= 34,11 \Omega \cdot m \end{aligned}$$

TABEL II HASIL PENGUKURAN RESISTANSI TANAH DI AREA GARDU INDUK TELING

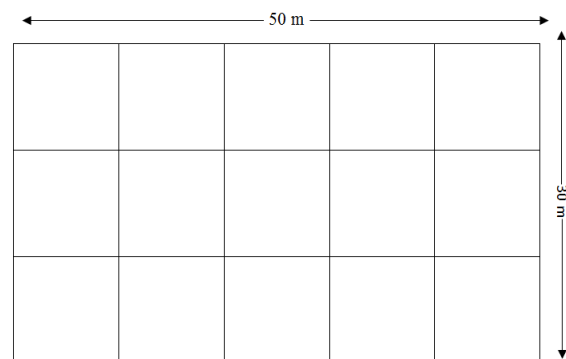
| No. | Kedalaman Batang Pentanahan (m) | Resistansi Terukur (Ω) |
|-----|---------------------------------|------------------------|
| 1.  | 0,40                            | 32,8                   |
| 2.  | 0,80                            | 24,6                   |
| 3.  | 1,2                             | 13,9                   |
| 4.  | 1,6                             | 12,3                   |
| 5.  | 2,0                             | 9,8                    |

Sumber : Pengukuran resistansi tanah pada area gardu induk Teling

TABEL III ARUS GANGGUAN PADA BUSBAR GARDU INDUK TELING

| Busbar GI Teling | MAX Short Circuit Current |           |            |
|------------------|---------------------------|-----------|------------|
|                  | Ip (kA)                   | Ikss (kA) | skss (MVA) |
| 3 phase          | 15,513                    | 6,408     | 723,6      |

Sumber : PT. PLN (Persero) Wilayah Suluttenggo, AP2B Sistem Minahasa



Gambar 8 Tata letak grid tanpa rod

TABEL IV PENTANAHAN GARDU INDUK TELING TAHUN 2016

| No | Bay     | Peralatan Gardu Induk | Resistansi ( $\Omega$ ) |      |      |
|----|---------|-----------------------|-------------------------|------|------|
|    |         |                       | R                       | S    | T    |
| 1. | Trafo 1 | CT                    | 0,10                    | 0,18 | 0,10 |
|    |         | LA                    | 0,29                    | 0,30 | 0,29 |
|    |         | PMS                   | -                       | -    | -    |
|    |         | PMT                   |                         | 0,10 |      |
|    |         | CT                    | 0,90                    | 0,30 | 0,10 |
| 2. | Trafo 2 | LA                    | 0,11                    | 0,10 | 0,10 |
|    |         | PMS                   | -                       | -    | -    |
|    |         | PMT                   |                         | 0,10 |      |
|    |         | CT                    | 0,18                    | 0,17 | 0,17 |
|    |         | LA                    | 0,37                    | 0,37 | 0,36 |
| 3. | Trafo 3 | PMS                   | 0,8                     | 0,8  | 0,8  |
|    |         | PMT                   |                         | 0,15 |      |

Sumber : PT. PLN (Persero) Wilayah Suluttenggo, AP2B Sistem Minahasa

Dari perhitungan resistivitas tanah adalah 34,11  $\Omega$ .m dan area gardu induk berbentuk persegi yaitu 30 x 50 m maka luas areanya adalah 1500 m<sup>2</sup>

2) Ukuran konduktor

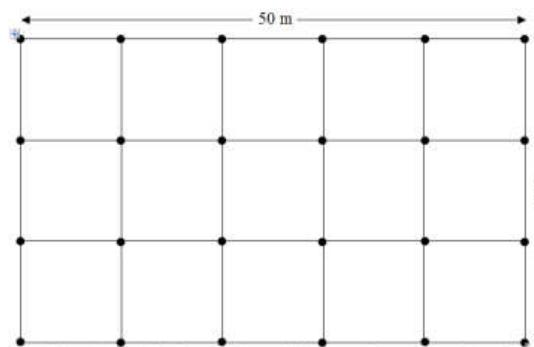
Ukuran konduktor yang akan digunakan dengan mengetahui terlebih dahulu besarnya arus gangguan tertinggi yaitu 15.513 A (lihat tabel 3.2). Dengan menggunakan tabel nilai tipikal Df (lihat lampiran 3) untuk durasi gangguan 0,5 s, faktor penurunan D<sub>f</sub> 1,0 maka arus asimetris rms adalah 15.513 A.

$$\begin{aligned}
 A_{kcmil} &= I \cdot K_f \cdot \sqrt{tc} \\
 &= 15.513 \cdot 7,06 \sqrt{0,5} \\
 &= 77,44 \text{ kcmil} \\
 &= 38,72 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

3) Kriteria tegangan sentuh dan tegangan langkah

Untuk ketebalan lapisan permukaan batu pecah (*crushed rock*) yaitu h<sub>s</sub> = 0,102 m, dengan resistivitas ( $\rho_s$ )= 2500  $\Omega$ .m dan resistivitas tanah ( $\rho$ ) = 289  $\Omega$ .m, sehingga K dapat dihitung dengan persamaan (13) dan persamaan (15) berikut:

$$\begin{aligned}
 E_{step\ 70} &= (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} \\
 &= (1000 + 6 \cdot 0,70 \cdot 2.500) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} \\
 &= 2553 \text{ V} \\
 E_{step\ 70} &= (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} \\
 &= (1000 + 1,5 \cdot 0,70 \cdot 2.500) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} \\
 &= 804,75 \text{ V}
 \end{aligned}$$



Gambar 9 Tata letak Grid rod

4) Bentuk tata letak grid

Dari gambar layout gardu induk Teling (lihat gambar 8 dan lihat lampiran 4) diasumsikan A = 50 x 30 dengan jarak konduktor yang sama yaitu D = 10, kedalaman grid h = 0,5, panjang total konduktor L<sub>T</sub> = (6x30) + (4x50) = 380 m.

5) Resistansi grid

Dari persamaan L<sub>T</sub> = 380 m dan luas area A = 1500 m<sup>2</sup>, resistansi grid dapat dihitung dengan persamaan (18) berikut :

$$\begin{aligned}
 R_g &= \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \left( 1 + \frac{1}{1+h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \\
 &= 34,11 \left[ \frac{1}{380} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot 1500} \left( 1 + \frac{1}{1+0,5 \sqrt{\frac{20}{1500}}} \right) \right] \\
 &= 0,47 \Omega
 \end{aligned}$$

6) Arus grid maksimum

Arus grid maksimum dapat dihitung menggunakan persamaan (19) mengacu untuk D<sub>f</sub> = 1,0 dan faktor pembagi arus S<sub>f</sub> = 0,6. Maka I<sub>G</sub> dapat dihitung dengan persamaan (20) berikut:

$$\begin{aligned}
 I_G &= D_f \cdot S_f \cdot 3I_0 \\
 &= 1 \cdot 0,6 \cdot 15.513 \\
 &= 9307,8 \text{ A}
 \end{aligned}$$

7) GPR (Ground Potential Rise)

Perbandingan I<sub>G</sub> dan R<sub>g</sub> atau GPR dengan tegangan sentuh yang dapat ditoleransi E<sub>touch 70</sub> dihitung dengan persamaan (21) berikut :

$$\begin{aligned}
 GPR &= I_G \cdot R_g \\
 &= 9307,8 \cdot 0,47 \\
 &= 4.374,66 \text{ V}
 \end{aligned}$$

8) Tegangan mesh

E<sub>m</sub> dihitung dengan persamaan (22) :

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_C \cdot L_R}$$

TABEL V HASIL PERHITUNGAN PENTANAHAN GRID TANPA BATANG PENTANAHAN DAN PENTANAHAN GRID DENGAN BATANG PENTANAHAN

| No. | Indikator          | Pentanahan Grid         |                          |
|-----|--------------------|-------------------------|--------------------------|
|     |                    | Tanpa Batang Pentanahan | Dengan Batang Pentanahan |
| 1.  | Resistansi grid    | 0,47 Ω                  | 0,18 Ω                   |
| 2.  | Arus grid maksimum | 9307,8 A                | 9307,8 A                 |
| 3.  | GPR                | 4374,66 V               | 1675,40 V                |
| 4.  | Tegangan Mesh      | 461,42 V                | 500,92 V                 |
| 5.  | Tegangan Langkah   | 63,47 V                 | 63,47 V                  |

TABEL VI PERBANDINGAN TEGANGAN MESH DENGAN BATAS KRITERIA TEGANGAN SENTUH

| No. | Indikator                                       | Tegangan Mesh | Batas Kriteria Tegangan Sentuh |
|-----|---|---------------|--------------------------------|
| 1.  | Sistem pentanahan grid tanpa batang pentanahan  | 461,42 V      | 829,84 V                       |
| 2.  | Sistem pentanahan grid dengan batang pentanahan | 500,92 V      | 829,84 V                       |

$$= \frac{34,11 \cdot 9307,8 \cdot 1,09 \cdot 0,72}{160 \cdot 380}$$

$$= 461,42 \text{ V}$$

9)  $E_m$  vs  $E_{touch}$

Dari perhitungan diatas  $E_{mesh}$  lebih rendah dari tegangan sentuh yang dapat ditoleransi yaitu 461,42 V dan 829,84 V

B. Perhitungan grid dengan batang pentanahan (*ground rod*).

Untuk perhitungan grid dengan batang pentanahan, resistivitas tanah, ukuran konduktor dan kriteria tegangan sentuh dan tegangan langkah sama dengan perhitungan grid sebelumnya. Sehingga langsung ke tata letak grid berikut:

1) Bentuk tata letak grid

Perhitungan dengan jarak grid  $D = 10$  m, dan ukuran grid  $50 \times 30$  m, pola konduktor grid  $6 \times 4$  diasumsikan dengan menggunakan 24 batang pentanahan masing-masing panjang panjang 2 meter, panjang gabungan konduktor grid  $L_T$  adalah  $(4 \times 50 \text{ m}) + (6 \times 30 \text{ m}) = 380$  m dapat dilihat seperti gambar (9) :

2) Resistansi grid

Untuk menghitung  $R_g$  seperti langkah pada perhitungan sebelumnya tentukan  $L_T$  adalah  $380 + (24 \times 2) = 428$  m dan luas area  $A = 1500 \text{ m}^2$ ,  $R_g$  dapat dihitung dengan persamaan (18) berikut :

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

$$= 34,11 \left[ \frac{1}{428} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 1500}} \left( 1 + \frac{1}{1+0,5 \sqrt{\frac{20}{1500}}} \right) \right]$$

$$= 0,18 \Omega$$

3) Arus grid maksimum dan GPR

Arus grid maksimum sama seperti dihitung menggunakan persamaan (20) seperti sebelumnya yaitu 9.307,8 V dan  $R_g = 0,18 \Omega$ , maka :

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g$$

$$= 9307,8 \cdot 0,18$$

$$= 1675,40 \text{ V}$$

4) Tegangan mesh

Tegangan mesh dapat dihitung dengan persamaan (22),  $K_m$  dengan nilai n yang akan berbeda yaitu :

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_C + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{L_r}{L_x^2 + L_y^2} \right) \right] L_R}$$

$$= \frac{34,11 \cdot 9307,3 \cdot 1 \cdot 0,72}{380 + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{2}{(50)^2 + (30)^2} \right) \right] 48}$$

$$= \frac{1.936.662,98}{456,32}$$

$$= 500,92 \text{ V}$$

5)  $E_m$  vs  $E_{touch}$

Dari hasil perhitungan diatas  $E_m$  lebih rendah dari  $E_{Touch}$  yang dapat ditoleransi yaitu 500,92 V dan 804,75 V

6) Tegangan langkah ( $E_{step}$ )

Dimana  $L_c = 160$  m,  $L_R = 380$  m maka :

$$L_s = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R$$

$$= 0,75 \cdot 160 + 0,85 \cdot 380$$

$$= 443$$

Maka  $E_s$  dapat ditentukan dengan persamaan (22):

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$$

$$= \frac{34,11 \cdot 0,123 \cdot 0,72 \cdot 9307,8}{443}$$

$$= 63,47 \text{ V}$$



### C. Pembahasan sistem pentanahan gardu induk Teling

Dari hasil perhitungan dapat dianalisa beberapa hal yang menjadi perhatian dalam menentukan besarnya nilai resistansi pentanahan yang sesuai dengan standar pada gardu induk yaitu  $0 - 1 \Omega$ .

#### 1) Resistivitas tanah,

Resistivitas tanah menjadi parameter yang penting yaitu menentukan jenis pentanahan seperti apa yang akan digunakan sesuai dengan kondisi tanah tersebut. Dalam perhitungan yang telah dilakukan resistivitas yang didapat dari penelitian ini adalah  $34,11 \Omega \cdot m$ , dengan kedalaman tanah 2 meter.

#### 2) Ukuran konduktor

Ukuran konduktor menjadi hal yang penting dikarenakan dapat menentukan besarnya arus gangguan yang akan di distribusikan ke tanah. Dari hasil perhitungan didapatkan ukuran konduktornya adalah  $38,72 \text{ mm}^2$

#### 3) Tegangan sentuh dan tegangan langkah,

Keadaan aman (*safety*) seseorang dalam area gardu induk bergantung pada pencegahan terhadap besarnya nilai energi kejutan listrik agar diserap baik pada kondisi normal ataupun gangguan. Energi yang dimaksud adalah tegangan sentuh dan tegangan langkah, tegangan tersebut memiliki batas kriteria yang diizinkan dari hasil perhitungan adalah  $E_{\text{step } 70 \text{ kg}} = 2553 \text{ V}$  dan  $E_{\text{touch } 70 \text{ kg}} = 804,75 \text{ V}$

#### 4) Resistansi grid, arus grid maksimum, GPR (*Ground Potential Rise*), tegangan mesh, tegangan langkah

Dari tabel V dapat dilihat bahwa ada perbedaan nilai resistansi grid karena dipengaruhi oleh penambahan jumlah batang pentanahan, nilai GPR akan lebih kecil, dan perbedaan nilai tegangan mesh juga.

Dari tabel VI dapat dilihat bahwa tegangan mesh lebih rendah dari batas kriteria tegangan sentuh, sehingga tegangan mesh memenuhi standar keamanan (*safety*) terhadap seseorang disekitar gardu induk.

Untuk perbandingan tegangan langkah terhadap batas kriteria tegangan sentuh lebih rendah yaitu  $63,47 \text{ V}$  dan  $2533 \text{ V}$  sehingga, tegangan langkah memenuhi standar keamanan (*safety*) terhadap seseorang disekitar gardu induk.

#### 5) Solusi modifikasi

Solusi modifikasi bentuk pentanahan untuk mendapatkan nilai resistansi pentanahan yang rendah yaitu :

- 1) Menambahkan batang elektroda pentanahan dengan jumlah lebih banyak
- 2) Menambah kedalaman pentanahan dengan tujuan mendapatkan nilai resistansi yang lebih rendah

- 3) Menambahkan konduktor grid dengan memperkecil ukuran jarak antar konduktor grid sehingga nilai resistansi grid akan lebih rendah.

## IV. PENUTUP

### A. Kesimpulan

Dari hasil analisa dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Nilai resistansi sistem pentanahan peralatan gardu induk memenuhi standar yaitu  $0,10 \Omega$  sampai  $0,8 \Omega$ , dibandingkan dengan hasil perhitungan yaitu pentanahan grid tanpa batang pentanahan resistansi grid ( $R_g=0,47 \Omega$ ) dan pentanahan grid dengan batang pentanahan ( $R_g=0,18 \Omega$ ). Semakin rendah nilai resistansi pentanahan maka semakin rendah GPR (*Ground Potential Rise*)
- 2) Arus grid maksimum pentanahan gardu induk telinga mampu meneruskan arus gangguan ke tanah hingga  $9307,8 \text{ A}$ , dengan ukuran konduktor grid  $38,72 \text{ mm}^2$
- 3) Tegangan mesh lebih rendah dari batas kriteria tegangan sentuh memenuhi standar yaitu  $461,42 \text{ V}$  vs  $829,84 \text{ V}$  dan  $500,92 \text{ V}$  vs  $829,84 \text{ V}$
- 4) Tegangan langkah lebih rendah dari batas kriteria tegangan sentuh memenuhi standar yaitu  $63,47 \text{ V}$  vs  $2533 \text{ V}$
- 5) Penambahan jumlah batang elektroda dan konduktor grid akan memberikan solusi modifikasi untuk mendapatkan nilai resistansi yang lebih rendah

### B. Saran

Setelah melakukan penelitian ini dapat diberikan saran kepada terhadap nilai pentanahan gardu induk yaitu dengan melakukan perawatan terhadap kondisi sambungan konduktor grid dan pemeriksaan secara berkala kondisi bahan konduktor apakah masih dalam kondisi baik atau tidak karena terdapat perbedaan nilai resistansi pentanahan yang bervariasi

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Arismunandar, DR.M.A.Sc, *Teknik Tenaga Listrik*, Pradnya Paramita, Jakarta, 1997
- [2] C.K, Romesh. *EHV-AC, HVDC Transmission & Distribution Engineering*. Delhi, India : Khanna Publishers, 1999.
- [3] IEC 60479-2:1987. *Guide to effects of current on human beings and livestock. Special aspects relating to human beings*.
- [4] IEEE Std 142-2000. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. New York, USA: The Institute of Electrical And Electronics Engineers,inc. 2000.
- [5] IEEE Std 80-2000. *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, USA : The Institute of Electrical And Electronics Engineers,inc. 2000

- [6] IEEE, Transactions on Power Apparatur And System. 1980
- [7] Hutauruk, T.S. *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Jakarta: Erlangga. 1999.
- [8] PT. PLN (Persero) AP2B Tomohon, *Gardu Induk Teling*.
- [9] PUIL 2000. *Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional. 2000



Agus Pranoto lahir di Kobisonta, 17 Agustus 1992, memulai pendidikan Strata 1 pada tahun 2011. Di Universitas Sam Ratulangi, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro mengambil konsentrasi minat Tenaga Listrik.

Penulis pernah mengambil kerja praktek di PT. PJBS PLTU Amurang selama 2 bulan pada Agustus – September tahun 2015