



DESAIN PEMASANGAN SISTEM PEMBUMIAN PADA GARDU INDUK BARU DI GARDU INDUK KOTACANE 1 X 30 MVA ACEH TENGGARA



MASHADI¹, OLNES Y HUTAJULU², KINANTI WIJAYA³

¹CV. Madintras Teknik Mandiri, Kota Medan

¹²³Pendidikan Profesi Insinyur, Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan

¹²Bidang Keahlian Teknik Elektro

³Bidang Keahlian Teknik Sipil

Email : Mashadi2171@yahoo.com

ABSTRAK

Kehadiran energi listrik yang handal dan berkelanjutan menjadi sangat penting untuk mendukung kehidupan manusia modern saat ini, maka untuk itu perlu dilakukan pembangunan jaringan transmisi yang saling terhubung satu sama lain antar gardu induk. Salah satu komponen penting untuk menjaga ketersediaan tenaga listrik yang handal selain sistem proteksi tenaga listrik adalah sistem pembumian pada gardu induk itu sendiri. Sistem pembumian berguna untuk meminimalisir gangguan tenaga listrik akibat tegangan lebih (*over voltage*) yang berasal dari pengoperasian peralatan yang ada dalam sistem gardu induk maupun akibat faktor eksternal yakni sambaran petir (*lightning impulse*). Pada tulisan ini akan di gambarkan bagaimana desain dan pemasangan sistem pembumian pada gardu induk. Jenis pemasangan sistem pembumian yang di pilih adalah dengan metode mesh atau grid. Pembuatan sistem pembumian ini mengacu kepada rencana kerja dan syarat kontak kerja, rumus- rumus yang lazim di gunakan dalam teori teknik tenaga listrik, kaidah-kaidah dan peraturan sistem tenaga listrik yang berlaku. Bakuan dan variable yang paling penting dalam desain ini adalah jenis dan resistiviti tanah, nilai tahanan tanah, tegangan langkah, tegangan sentuh dan panjang konduktor yang digunakan. Hasil dari desain ini setelah dilakukan pekerjaan selama satu bulan di area gardu induk baru dan di ukur menggunakan earth tester menunjukkan hasil yang baik sebesar $\leq 0,195$ Ohm seperti yang di persyaratkan pemberi kerja yakni 0.3 Ohm. Hasil pengukuran ini artinya menunjukkan hasil desain sistem pembumian telah berhasil dilaksanakan dengan baik yaitu $0,195 < 0,3$ Ohm.

Kata Kunci: *Sistem pembumian pada gardu induk baru*

ABSTRACT

The presence of reliable and continuous electrical energy is very important to support modern human life, therefore its necessary to build a transmission network that connect to each other between substations. One of the important components to maintain the availability of reliable electric power in addition to the electric power protection system is the grounding system at the substation. The grounding system is useful for minimizing electric power disturbances due to overvoltage originating from the operation of existing equipment in the substation system as well as due to other factors external is a lightning impulse. In this paper, we will describe how to design and install a grounding system in substations. The type of installation of the grounding system selected is the mesh or grid method. The making of this grounding system refers to the work plan and working contract conditions, formulas commonly use in electric power engineering theory, the applicable rules and regulation of electric power system. The most important standards and variables in this design are the type and resistivity of ground resistance, step voltage, touch voltage and the length of conductor used. The result of this design after working for one month in the new substation area and measured using an Earth tester showed good result of ≤ 0.19 ohm as required by the owner is 0.3 ohm. The result of this measurement mean that the result of the grounding system design has been successfully implemented is $0.19 < 0.3$ ohm.

Keywords: *The grounding system at new substation*

1. Pendahuluan

Latar Belakang

Pembangunan sistem jaringan tenaga listrik yang meliputi transmisi dan gardu induk baru merupakan salah satu unsur penting dalam rangka penyediaan tenaga listrik yang terus menerus, handal dan efisien. Transmisi tenaga listrik dan gardu induk digunakan sebagai sarana pengiriman tenaga listrik dari pembangkit-pembangkit listrik yang letaknya jauh dari pusat pemanfaatan listrik atau konsumen. Untuk kepentingan tersebut pihak PT.PLN (Persero) Unit Induk Pembangunan Jaringan Sumatera Utara melakukan pembangunan gardu induk baru di lokasi Kotacane Aceh Tenggara, dimana tenaga listriknya di transmisikan dari gardu induk Brastagi di tanah karo. Pembangunan gardu induk baru diareal tanah seluas 1,5 ha sebesar 30 MVA ini terletak di Kotacane desa Babel gabungan, Kelapa gading, dimaksudkan untuk menggantikan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Kuning sebesar 5 MVA yang sudah berusia tua dan tidak efisien lagi.

Dalam rangka penyediaan tenaga listrik yang cukup dan berkelanjutan, pemerintah juga telah menerbitkan Undang Undang No. 30 Tahun 2009 tentang ketenagalistrikan yang azas dan tujuannya adalah; *manfaat; efisiensi berkeadilan; berkelanjutan; optimalisasi ekonomi dalam pemanfaatan sumber daya energi; mengandalkan pada kemampuan sendiri; kaidah usaha yang sehat; keamanan dan keselamatan; kelestarian fungsi lingkungan; dan otonomi daerah.*

Selanjutnya Pembangunan ketenagalistrikan bertujuan untuk menjamin ketersediaan tenaga listrik dalam jumlah yang cukup, kualitas yang baik, dan harga yang wajar dalam rangka meningkatkan kesejahteraan dan kemakmuran rakyat secara adil dan merata serta mewujudkan pembangunan yang berkelanjutan.

Sejak dibangun gardu induk baru tersebut mulai Desember 2011, dengan lintasan transmisi sepanjang 220,96 KMS dan telah beroperasi sejak Desember 2018, diharapkan usaha penyediaan tenaga listrik yang handal dan berkelanjutan dapat terpenuhi. Pemerintah dalam hal ini PT.PLN mengalami keuntungan karena tidak mengandalkan solar dalam operasional PLTD Kuning.

Salah satu unsur penting yang perlu diperhatikan dan harus dilakukan dalam pembangunan gardu induk baru agar seluruh peralatan elektrikal tegangan tinggi (*High*

Voltage Apparatus) dapat beroperasi dengan baik sesuai fungsinya adalah tersedianya sistem pembumian yang baik dan benar. Sehingga sistem pembumian ini diharapkan dapat menyalurkan tegangan lebih (*Over voltage*) dan gangguan sambaran petir (*lightning impulse*) ke bumi. Maka dengan demikian seluruh peralatan yang dimaksud dan peralatan pendukung lainnya serta infrastruktur dalam areal gardu induk dapat beroperasi secara terus menerus, gangguan-gangguan yang mengakibatkan peralatan berhenti beroperasi sehingga penyediaan tenaga listrik terhenti dapat ditekan sekecil mungkin.



Gambar 1 : Gardu induk Kotacane (1x30 MVA)

Rumusan Masalah

Masalah yang akan diselesaikan adalah merencanakan dan memasang sistem pembumian (*grounding system*) dengan jenis mesh atau grid di areal peralatan tegangan tinggi 150 kV (*switchyard*) gardu induk baru Kotacane sesuai ketentuan-ketentuan yang ditetapkan.

Tujuan

Tujuan dalam penulisan jurnal ini untuk menggambarkan dan menjelaskan bagaimana sistem pembumian pada gardu induk di rencanakan dan dipasang menggunakan perhitungan dan ketentuan-ketentuan yang ditetapkan. Selanjutnya juga menjelaskan bagaimana perhitungan dan hubungan antar unsur-unsur perencanaan sistem pembumian yaitu; luas areal yang tersedia, jenis tanah, hamparan krikil, jenis konduktor yang digunakan, resistiviti tanah terukur, tegangan langkah dan tegangan sentuh yang di syaratkan, dan nilai akhir resistansi sistem pembumian yang di hasilkan.

2. Kajian Literatur

Konsep dasar dalam desain dan pemasangan sistem pembumian ini mengacu kepada standar dan pedoman serta syarat teknis yang di definisikan dan dituangkan dalam uraian sbb;

- a. Dokumen kontrak kerja No: 011.PJ.2011 16 Desember 2011 dari pihak pemberi pekerjaan, Bagian V syarat teknik, Halaman 1, Data teknis dari sistem gardu induk yang akan di bangun yakni;

Tabel 1 ; Data teknis gardu induk Kotacane

No	Data Tehnis	Keterangan
1	Nominal System Voltage	150 kV
2	Highest System Voltage	170 kV
3	Metoda System Grounding	Solid
4	Impulse Withstand Voltage (Peak)	
	- Switchgear	750 kV
	- Transformers	650 kV
5	One minutes Power Frequency withstand voltage (Peak)	
	- Switchgear	325 kV
	- Transformers	275 kV
6	Isulator Creepage Phase to Earth	3750 mm
7	Rated Fault Level (3 phase Symetrical)	31,5 kA at 170 kV
8	Rated Frequency	50 Hz

Selanjutnya dalam syarat-syarat teknis tersebut pada hal 23 bagian 3.3.9 Sistem Pembumian juga selain mengacu standar IEEE 80-1986 juga disebutkan bahwa sistem pembumian didesain untuk menahan arus hubung tanah selama 1 detik dan kenaikan distribusi arus gangguan pada tiap lokasi ≤ 5 kV, Desain Grid/Mesh pembumian diseluruh lokasi switchyard berukuran maksimal 10x10 mtr antara jalur yang parallel dengan nilai tahanan bersama dari Grid pembumian dan titik pembumian $\leq 0,3$ Ohm, Grid pembumian harus terbuat dari konduktor berbahan hard draw high conductivity copper strip yang memiliki luas penampang minimum 150 mm² dan di tanam di tanah pada kedalaman 80 cm dari permukaan dengan pemasangan di setiap sambungan konduktor menggunakan metode themite cadweld.

- b. Menggunakan pedoman standar Institut of Electrical and Electonic Engineers (IEEE) 80 - 1986 " Guide For Safety in AC Substation grounding".
- c. Mengikuti standar SNI 04-0225-2000 Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000).

Menurut pedoman desain dan pembuatan sistem pembumian yang aman pada gardu induk yang mengacu pada IEEE 80-1986, dijelaskan beberapa pengertian dan standar baku yang perlu diketahui dan dipahami. Hal tersebut dapat kita ketahui dari beberapa uraian dan pedoman yang di bahas dalam uraian berikut dibawah ini.

2.1 Sistem pembumian (Grounding system) dan pembumian peralatan (Equipment grounding)

Sistem pembumian adalah suatu rangkaian konduktor yang di buat didalam tanah dari bahan konduktor penghantar atau batang elektroda berkonduksi tinggi, dengan cara ditanam secara sejajar atau radial, saling bersilang membentuk kisi-kisi persegi atau ditancapkan dengan kedalaman tertentu didalam tanah untuk mendapatkan nilai tahanan tanah (*resistansi*) yang rendah antara 0 - 1 Ohm yang dihubungkan ke peralatan dan instalasi listrik.

Menghubungkan peralatan dan instalasi listrik dengan tanah (bumi) bertujuan untuk mengamankan komponen-komponen peralatan dan instalasi listrik dari bahaya tegangan dan arus listrik berlebih dan mengamankan tubuh manusia dari bahaya sengatan listrik.

Faktor yang mempengaruhi besarnya Tahanan tanah pada sistem pembumian yaitu;

- a. Resistivitas tanah
- b. Panjang konduktor penghantar atau elektroda pembumian.
- c. Luas penampang dan tahanan jenis konduktor atau elektroda pembumian.

Sistem pembumian peralatan adalah suatu sistem yang menghubungkan bagian badan atau rangka (casing) instalasi dan peralatan listrik dan bagian-bagian logam atau bagian yang dapat menghantarkan arus listrik, yang pada saat beroperasi normal tidak di aliri arus listrik dengan sistem pembumian di dalam tanah.

2.2 Sistem pembumian dengan metode mesh atau grid

Sistem pembumian dengan metode grid atau mesh adalah satu rangkain koduktor dengan daya hantar tinggi yang dibuat didalam tanah dengan kedalaman tertentu, dengan cara dipasang tersusun secara vertikal membujur dan melintang dengan jarak tertentu. Sehingga membentuk menyerupai jaring atau kisi-kisi persegi panjang untuk mendapatkan nilai tahanan tanah yang rendah.

2.3 Resistivitas tanah dan pengukurannya

Resistivitas tanah adalah kemampuan daya hambat tanah (*resistansi*) terhadap aliran arus listrik yang mengalir.

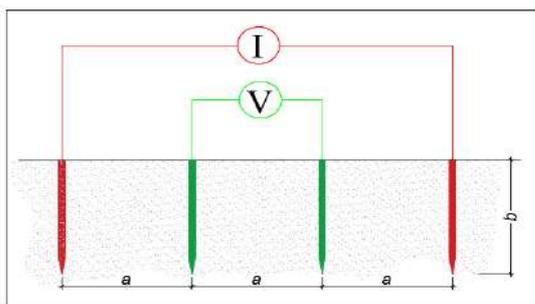
Tabel 2 ; Data resistansi tanah (sumber :PUIL 2000)

No	Jenis Tanah	Resistans Jenis (Ohm)
1	Tanah Rawa	30
2	Tanah Liat dan Tanah Ladang	100
3	Pasir Basah	200
4	Kerikil Basah	500
5	Pasir dan Kerikil Kering	1000
6	Tanah Berbatu	3000

Daya hambat tanah terhadap aliran arus listrik berbeda-beda besarnya sesuai dengan jenis dan kondisi tanah (lihat tabel 2).

Pengukuran resistansi tanah ini sangat perlu dilakukan untuk mendapatkan dengan pasti nilai resistansi tanah dilokasi gardu induk baru.

Pengukuran dapat dilakukan di beberapa titik yang dianggap perlu dan mewakili nilai resistansi tanah sekitarnya. Pengukuran ini dapat dilakukan dengan metode yang sangat umum dikenal dengan metode *Wanner* yaitu; metode empat pin dimana empat buah batang probe penghantar ditancapkan kedalam tanah sepanjang garis lurus terpisah dengan jarak (*a*) yang sama dan pada kedalaman (*b*), untuk mendapatkan nilai tahanan tanah (*R*). Dua batang probe elektroda terdalam diukur kemudian dibagi dengan arus yang terukur pada dua batang probe elektroda terluar.



Gambar 2 : Pengukuran resistiviti tanah metode Wanner 4- Pin

Kemudian dengan metode tersebut dapat dihitung resistiviti tanah menurut standar IEEE 80-2000 hal. 53 sbb:

$$\rho_a = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \dots\dots\dots (1)$$

- ρ_a = resistivitas tanah (Ωm)
- R = resistansi yang diukur (Ω)
- a = Jarak antara probe elektroda (m)
- b = kedalaman probe elektroda (m)

Jika kedalaman (*b*) lebih kecil dibandingkan dengan jarak (*a*) maka persamaan (1) diatas dapat di sederhanakan menjadi ;

$$\rho_a = 2 \pi aR \dots\dots\dots (2)$$

2.4 Konduktor dan ukurannya

Konduktor adalah suatu alat yang berfungsi sebagai penghantar arus listrik. Dalam pembuatan sistem pembumian digunakan batang pentanahan dan kawat konduktor

sebagai penghantarnya yang terbuat dari tembaga keras dengan daya hantar tinggi dan nilai tahanan yang rendah, tahan terhadap korosi, begitu juga dengan peralatan pendukungnya seperti clamp penyambung yaitu; grounding clamp, joint sleeve, grouding scoen, thermite weld, terbuat dari bahan yang sama. Hal ini dimaksudkan untuk tujuan:

- a. Peralatan pembumian memiliki daya hantar (*konduktivitas*) yang tinggi dan handal.
- b. Memiliki umur penggunaan yang lama untuk mengatasi korosi didalam tanah dan kemampuan mekanik yang baik.

Sementara ukuran konduktor yang digunakan juga menjadi pertimbangan yang penting. Ukuran luas penampang konduktor yang di gunakan akan mempengaruhi besarnya nilai tahanan sistem pembumian, kecepatan mengalirkan dan kemampuan menahan besarnya arus dan tegangan yang melaluinya menuju bumi. Ukuran Konduktor yang akan digunakan dapat dihitung menurut Standar IEEE 80-1986 hal.65 adalah;

$$I_g = A_{mm} \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{33.S}\right]} \log_{10} \left[1 + \frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right] \dots\dots\dots (3)$$

- I_g = Arus gangguan rms (kA)
- A_{mm} = Penampang konduktor (mm²)
- S = waktu (detik) saat arus (I_g) terjadi
- T_m = Suhu maksimum yang diizinkan (450°C)
- T_a = Suhu maksimum sekitar (40°C)

2.5 Kriteria tegangan langkah dan tegangan sentuh

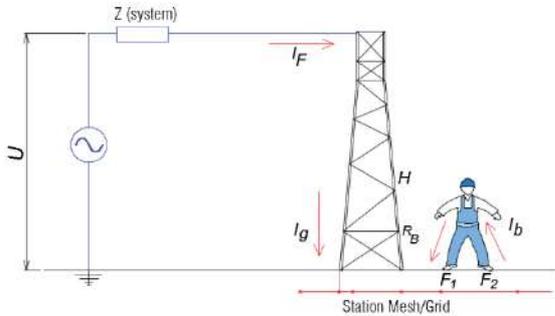
Selama terjadi gangguan maka arus dan tegangan akan di alirkan ke bumi oleh sistem pembumian, Arus konduktor pembumian menjadi jenuh yang muncul dari grid atau mesh dan elektroda pembumian yang di tanam di bawah permukaan bumi. Gradien tegangan yang dihasilkan memberikan efek pada peralatan yang di bumikan dan permukaan tanah. Gradien ini harus aman bagi tubuh manusia yang menyentuh dan melangkah disekitarnya.

Tegangan langkah adalah tegangan yang muncul pada kedua kaki manusia yang berdiri diatas tanah saat gangguan terjadi . Arus akan mengalir dari sistem pembumian melalui kaki melewati tubuh dan di terus kan kebumi melalui kaki yang lain dimana jarak antar kaki adalah 1 meter dengan diameter kaki 8 cm. Tegangan ini dapat dihitung dengan standar IEEE 80-1986 hal.46;

$$E_{step 70} = [1000 + 6. C_s \cdot \rho_s] \cdot IB_{70} \dots\dots\dots (4)$$

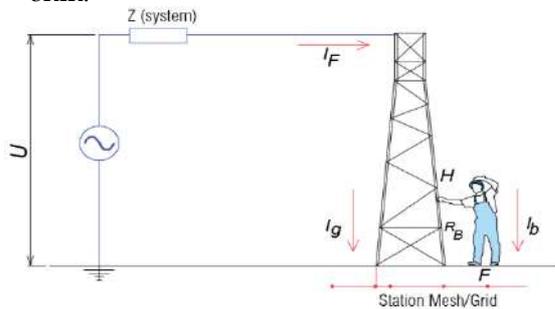
$$IB_{70} = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots (5)$$

- $E_{step\ 70}$ = kriteria tegangan langkah untuk tubuh manusia berat 70 kg
- C_s = factor reduksi resistivitas permukaan tanah
- ρ_s = resistivitas tanah (Ωm)
- C_s = lama gangguan (detik)



Gambar 3 : Ilustrasi terhadap paparan tegangan langkah

Tegangan sentuh adalah tegangan yang muncul saat menyentuh bagian benda yang dihubungkan ke sistem pembumian ketika gangguan terjadi. Arus akan mengalir melalui bagian yang tersentuh dan diteruskan ke bumi melalui bagian kaki atau bagian lainnya, yang dihambat dengan resistansi tubuh manusia sebesar ≤ 1.000 ohm.



Gambar 4 : Ilustrasi terhadap paparan tegangan sentuh

Tegangan ini dapat dihitung dengan standar IEEE 80-1986 hal.46;

$$E_{touch\ 70} = [1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s] \cdot IB_{70} \dots\dots (6)$$

$$IB_{70} = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \dots\dots (7)$$

- $E_{touch\ 70}$ = kriteria tegangan sentuh untuk tubuh manusia berat 70 kg
- C_s = factor reduksi resistivitas permukaan tanah
- ρ_s = resistivitas tanah (Ωm)
- C_s = lama gangguan (detik)

Selanjutnya faktor reduksi (C_s) sebagai resistansi tambahan yang merupakan lapisan hamparan kerikil diatas permukaan tanah yang lazim di gunakan pada switchyard

gardu induk dapat dihitung dengan persamaan;

$$C_s = 1 - \left[\frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09} \right] \dots\dots\dots (8)$$

- h_s = ketebalan lapisan permukaan tanah (mtr)
- ρ = resistivitas tanah (Ωm)
- ρ_s = resistivitas permukaan tanah (Ωm)

2.6 Arus grid atau mesh maksimum dan arus gangguan

Arus maksimum yang mengalir pada grid atau mesh dihitung dengan;

$$I_g = S_f \cdot I_f \dots\dots\dots (9)$$

- I_g = Arus grid simetris (Amp)
- S_f = factor pembagi arus gangguan (0,6)
- I_f = nilai rata-rata hubungan singkat (Amp)

Sedangkan untuk besar tegangan saat terjadinya gangguan atau GPR (ground Porential Rise) dapat dihitung dengan;

$$GPR = I_g \cdot R_g \dots\dots\dots (10)$$

- GPR = Ground potential rise (Volt)
- I_g = Arus grid simetris (Amp)
- R_g = Nilai resistansi grid/mesh (Ohm)

Dimana nilai tahanan resistansi grid yang telah buat di bawah permukaan tanah dapat dihitung dengan standar IEEE 80-1986 hal.81;

$$R_g = \frac{\rho}{4} \times \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \dots\dots\dots (11)$$

- R_g = Nilai resistansi grid/mesh (Ohm)
- L = Panjang konduktor (mtr)
- A = Luas area grid (m^2)

2.7 Tegangan Mesh dan tegangan langkah sebenarnya

Tegangan mesh (tegangan sentuh) dan tegangan langkah sebenarnya dapat dihitung dengan standar IEEE 80-1986 hal.113;

Tegangan mesh dihitung;

$$E_{mesh} = \frac{\rho \cdot I_g \cdot K_m \cdot K_i}{L} \dots\dots\dots (12)$$

Dimana K_m adalah;

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

$$K_{ii} = \frac{1}{2 \times n_m^{\frac{2}{n_m}}} ; K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} ; d = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$K_i = 0,656 + (0,172 \times n_m)$$

Tegangan langkah dihitung dengan;

$$E_{step} = \frac{\rho \cdot I_g \cdot K_s \cdot K_i}{L} \dots\dots\dots (13)$$

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

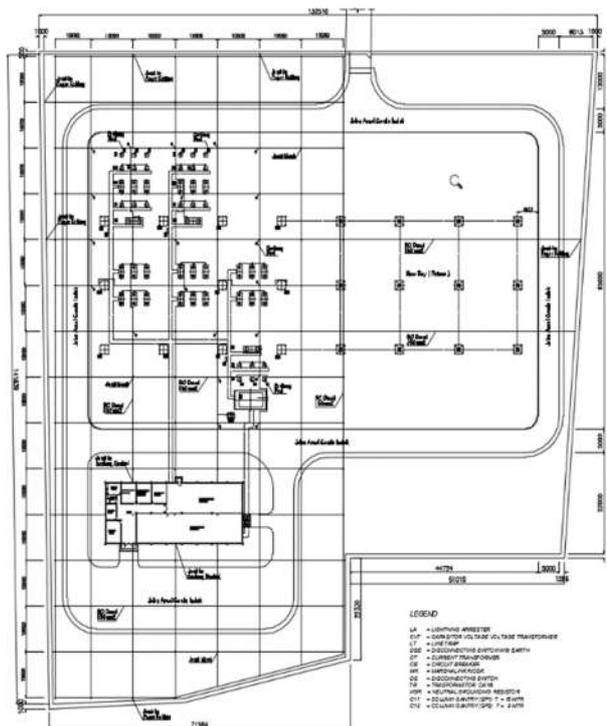
$$K_i = 0,656 + (0,172 \times n_s)$$

- E_{mesh} = tegangan grid (Volt)
- E_{touch} = tegangan langkah (Volt)
- I_g = arus grid simetris (Amp)
- K_m = factor jarak untuk tegangan grid
- K_s = factor jarak untuk tegangan langkah
- K_i = factor koreksi geometric grid
- L = Luas area grid (m²)
- K_{ii} = factor koreksi berat efek dari konduktor bagian dalam dan pojok
- K_h = factor koreksi berat efek dari kedalaman
- d = diameter konduktor
- D = jarak antara konduktor yang paralel
- h = kedalaman penanaman konduktor
- h_o = ketebalan lapisan permukaan tanah

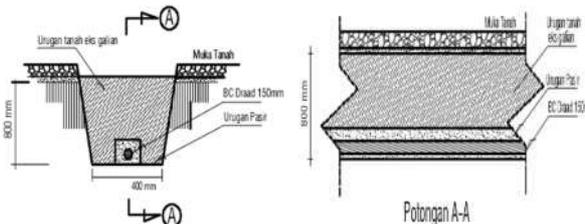
3. Metode desain dan pemasangan

Desain dan pemasangan sistem pembumian di lakukan dengan melakukan serangkaian kegiatan yang dapat di uraikan sbb;

- a. Melakukan kegiatan persiapan dengan mengumpulkan data-data yang di perlukan dalam rangka memenuhi kebutuhan sistem yang di persyaratkan.
- b. Melaksanakan pengukuran resistivity tanah diareal gardu induk baru dengan beberapa titik sampel.
- c. Melakukan perhitungan-perhitungan sistem pembumian yang akan dibuat berdasarkan studi literatur, data-data dan pedoman kerja.
- d. Membuat layout dan gambar kerja pemasangan sistem pembumian sesuai perhitungan desain.
- e. Mempersiapkan bahan, material dan alat serta tenaga kerja untuk melaksanakan pemasangan.
- f. Melakukan pemasangan bahan dan material pembumian dengan menanam di bawah permukaan tanah dengan kedalaman yang telah ditentukan.
- g. Melakukan pengukuran dan pengujian hasil pelaksanaan pekerjaan untuk memastikan bahwa sistem pembumian telah sesuai dengan perhitungan-perhitungan layout dan gambar-gambar kerja.



Gambar 5 : Layout pemasangan sistem pembumian gardu induk Kotacane



Gambar 6 : pemasangan konduktor pembumian

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Mengukur Resistiviti tanah nyata

Pengukuran resistiviti tanah yang sesungguhnya pada tanah area gardu induk sangat penting dilakukan untuk menentukan perhitungan variable-variable lain yang membentuk sistem pembumian. Langkah paling awal dilakukan adalah mengukur resistiviti tanah sebanyak 3 titik yang ditandai dengan titik ukur U1-U3 pada area gardu induk Kotacane hingga kedalaman 7 meter dengan interval pengukuran 1 meter hingga 3 kali pengukuran dengan hasil rata-rata 40,397 ohm seperti ditunjukkan dalam table 3.

Tabel 3 ; Data pengukuran resistiviti tanah nyata

NO	TITIK PENGUKURAN	HASIL UKUR RATA-RATA $\rho = 2 \pi nR$ (Ω/Mtr)	Keterangan
1	Titik Ukur U-1	40.098	
2	Titik Ukur U-2	40.037	
3	Titik Ukur U-3	41.056	
	Nilai Rata - Rata	40.397	

Selanjutnya melakukan identifikasi data-data dan pengukuran awal yang ditunjukkan dalam table 4.

Tabel 4 ; Data awal desain sistem pembumian

No	Identifikasi data	Simbol	Keterangan
1	Luas areal tanah tersedia; - Lebar (L_A) - Panjang (W_A) - Luas Area ($A = L_A \times W_A$)	(L_A) (W_A) A	71.500 Mtr 141.800 Mtr 10.138.7 Mtr
2	Resistiviti tanah nyata terukur	(ρ)	40.397 Ω
3	Tingkat arus gangguan hubung singkat	(I_f)	31.500 Amp
4	Maksimum tahanan grid disyaratkan	(R_{gmax})	0,3 Ω
5	Luas penampang konduktor disyaratkan	(d)	150 mm ²
6	Faktor pembagi arus gangguan pada GITET	(S_f)	0,6
7	Waktu gangguan hubung singkat	(t_z)	≤ 1 detik
8	Lapisan batu kerikil dipermukaan tanah	(h_z)	0.25 Mtr
9	Resistiviti batu kerikil	(ρ_z)	3.000 Ω
10	Kedalaman konduktor grid	(h)	0,8 Mtr
11	Jarak antara paralel konduktor	(D)	10

4.2 Perhitungan luas penampang dan panjang konduktor grid

Dengan menggunakan data-data pada table 3 dan table 4 diatas, maka dapat dihitung besarnya arus grid maksimum dengan persamaan (9) diatas, yaitu;

$$I_g = 0.6 \times 31,500$$

$$I_g = 18.900 \text{ Ampere}$$

Untuk mengetahui besar luas penampang konduktor yang akan digunakan dihitung dengan persamaan 3, yaitu;

$$18.900 = A_{mm} \cdot \sqrt{\frac{1}{[33 \times 1]}} \log_{10} \left[1 + \frac{450 - 40}{234 + 40} \right]$$

$$A_{mm} = \frac{18,900}{\sqrt{\frac{1}{[33 \times 1]} \log_{10} \left[1 + \frac{450 - 40}{234 + 40} \right]}}$$

$$A_{mm} = 171,187 \text{ cmil} ; \text{dimana } 1 \text{ cmil} = 0,0005 \text{ mm}^2$$

$$A_{mm} = 171,187 \times 0,0005$$

$$A_{mm} = 85,928 \text{ mm}^2 \text{ (disyaratkan } 150 \text{ mm}^2)$$

Artinya pada desain sesuai hasil perhitungan dapat digunakan konduktor dengan luas penampang 85, 928 mm².

Panjang konduktor grid yang di perlukan pada area seluas 71,5 x 141,8 mtr dengan jarak antara paralel konduktor D=10 dapat dihitung dengan menggunakan formula ;

$$L_1 = \left(\frac{W_A}{D} + 1 \right) \times L_A + \left(\frac{L_A}{D} + 1 \right) \times W_A$$

$$L_1 = \left(\frac{71,5}{10} + 1 \right) \times 141,8 + \left(\frac{141,8}{10} + 1 \right) \times 71,5$$

$$L_1 = 1.155 + 1.085,37$$

$$L_1 = 2.241.04 \text{ mtr}$$

Dengan menambahkan elektroda rod grid berdiameter 15,8 mm² panjang 4 m sebanyak 21 bh maka panjang keseluruhan dapat di hitung;

$$L = L_1 + L_2 \text{ dimana } L_2 = 4 \times 21 = 84 \text{ mtr}$$

$$L = 2.241.04 + 84 = 2.325,04 \text{ mtr}$$

4.3 Perhitungan kriteria tegangan langkah dan tegangan sentuh

Nilai tegangan langkah dan tegangan sentuh yang menjadi nilai acuan yang di izinkan dapat di hitung dengan persamaan (4),(6) dan (8). Menghitung factor reduksi (C_s) lapisan batu kerikil tebal 0,25 mtr dengan resistansi 3.000 ohm yang dihampar di area switchyard;

$$C_s = 1 - \left[\frac{0,09 \left(1 - \frac{40,397}{3.000} \right)}{2 \times 0,25 + 0,09} \right]$$

$$C_s = 1 - \left[\frac{0,088}{0,590} \right] ; C_s = 0,849$$

Untuk berat badan manusia 70 kg dihitung IB_{70} ;

$$IB_{70} = \frac{0,157}{\sqrt{1}} = 0,157$$

Tegangan langkah yang di izinkan ;

$$E_{step 70} = [1000 + 6 \times 0,849 \times 3.000] \cdot 0,157$$

$$E_{step 70} = 2.557,72 \text{ Volt}$$

Tegangan sentuh yang di izinkan;

$$E_{touch 70} = [1000 + 1,5 \times 0,849 \times 3.000] \cdot 0,157$$

$$E_{touch 70} = 757,18 \text{ Volt}$$

Selanjutnya besar tegangan yang timbul saat terjadi gangguan (GPR) dimana asumsikan menggunakan tahanan grid yang di izinkan sebesar 0,3 ohm sesuai tabel 4 diatas dapat di hitung dengan persamaan (10);

$$GPR = I_g \cdot R_g$$

$$GPR = 18.900 \times 0,3 = 5.670 \text{ Volt}$$

4.4 Perhitungan tahanan (resistansi) grid

Nilai tahanan grid yang di desain dapat dihitung setelah panjang konduktor grid diketahui dan resistiviti tanah (ρ) sebenarnya telah di ukur diareal pembuatan, dimana konduktor grid akan ditanam kedalaman (h)= 0.8 meter pada luas areal (A)=10.325,40 M². Tahanan (resistansi) grid dihitung menggunakan persamaan (11);

$$R_g = \frac{40,397}{4} \times \sqrt{\frac{3,14}{10.138,700} + \frac{40,397}{2.325,04}}$$

$$R_g = 10,0993 \times 0,0175 + 0,0173$$

$$R_g = 0,195 \text{ Ohm}$$

Menggunakan hasil perhitungan tahanan diatas dimana $R_g = 0.19 \text{ Ohm}$, kita dapat melihat seberapa besar tegangan yang timbul (GPR) saat gangguan terjadi ;

$$GPR = I_g \cdot R_g$$

$$GPR = 18.900 \times 0,19 = 3.591 \text{ Volt}$$

4.5 Perhitungan tegangan mesh nyata

Tegangan mesh nyata dihitung menggunakan data resistiviti tanah yang telah diukur. Pada perhitungan ini perlu dihitung terlebih dahulu factor jarak untuk tegangan mesh (K_m), untuk itu perlu diketahui terlebih dahulu jumlah konduktor parallel pada bidang lebar (N_m) dan konduktor parallel pada bidang panjang (N_s), dimana jarak antar konduktor paralel (D)=10, dihitung dengan formula ;

$$N_m = \frac{W_A}{D} + 1 \quad ; \text{dimana } N_m = \frac{71,5}{10} + 1 = 8 \text{ bh}$$

$$N_s = \frac{L_A}{D} + 1 \quad ; \text{dimana } N_s = \frac{141,8}{10} + 1 = 15 \text{ bh}$$

Selanjutnya dapat dihitung;

$$K_{ii} = \frac{1}{2 \times 8^8} = 0,297 \text{ bh}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0,8}{0,8}} = 1,414 \text{ mtr}$$

Dan diameter konduktor dihitung menggunakan diameter yang disyaratkan sebesar 150mm²;

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{150}{3,14}} = 13,823 \text{ cm}$$

maka $d = 13,823/1.000 = 0.0138$ meter

factor jarak untuk tegangan mesh;

$$K_m = \frac{1}{2 \times 3,14} \left[\ln \left(\frac{10^2}{16 \times 0,8 \times 0,0138} + \frac{(10+2 \times 0,8)^2}{8 \times 10 \times 0,0138} \right) - \frac{0,8}{4 \times 0,0138} \right] + \frac{0,297}{1,414} \times \ln \frac{8}{3,14 \times (2 \times 8 - 1)}$$

$$K_m = 0,159[6,510 + 0,210 \times (-1,817)]$$

$$K_m = 0,975 \text{ mtr}$$

Faktor koreksi tegangan mesh geometric;

$$K_i = 0,656 + (0,172 \times 8)$$

$$K_i = 2,032$$

Maka untuk perhitungan tegangan mesh sesuai persamaan (12) adalah;

$$E_{mesh} = \frac{40,397 \times 18.900 \times 0,975 \times 2,032}{2.325}$$

$$E_{mesh} = 651,207 \text{ Volt}$$

4.6 Perhitungan tegangan langkah nyata

Untuk menghitung besarnya nilai tegangan langkah nyata maka perlu dilakukan terlebih dahulu perhitungan terhadap factor jarak

untuk tegangan langkah (K_s) dan Faktor koreksi geometris mesh (K_i). Dengan menggunakan persamaan (13) diatas maka;

$$K_s = \frac{1}{3,14} \left[\frac{1}{2 \times 0,8} + \frac{1}{10 + 0,8} + \frac{1}{10} (1 - 0,5^{15-2}) \right]$$

$$K_s = 0,318[0,625 + 0,092 + 0,100(0,999)]$$

$$K_s = 0,260 \text{ mtr}$$

Faktor koreksi geometris tegangan langkah;

$$K_i = 0,656 + (0,172 \times 15)$$

$$K_i = 3,236$$

Maka tegangan langkah nyata dapat dihitung

$$E_{step} = \frac{40,397 \times 18.900 \times 0,260 \times 3,326}{2.325}$$

$$E_{step} = 276,658 \text{ Volt}$$

4.7 Evaluasi hasil perhitungan desain sistem pbumian

Evaluasi terhadap desain sistem pbumian dilakukan setelah seluruh rangkaian kegiatan diatas selesai dilaksanakan. Evaluasi diperlukan untuk memastikan bahwa hasil perhitungan, pemilihan bahan dan material serta aspek lain telah sesuai dan memenuhi kreteria-kreteria yang telah ditetapkan oleh literatur, standar pedoman dari pihak pemberi kerja. Data-data nilai tahanan mesh, tegangan sentuh, tegangan langkah hasil perhitungan desain harus lebih kecil nilainya dari standar dan kriteria yang ditetapkan. Data tersebut dapat dilihat pada tabel (5).

Tabel 5 ; Evaluasi hasil perhitungan desain

NO	URAIAN	Nilai		HASIL AKHIR
		KRITERIA	HASIL DESAIN	
1	Sistem Tegangan	150 kV	150 kV	OK
2	Tingkat arus gangguan 31,5 kA	18.900 A	18.900 A	OK
3	Maksimal Tahanan Mesh	0,3 Ω	0,19 Ω	OK
4	Diameter Konduktor (BCC)	150 mm ²	85.928 mm ²	150/OK
5	Tegangan gangguan mesh (GPR)	5.670 V	3.591 V	OK
6	Tegangan Langkah	2.557,72 V	276,65 V	OK
7	Tegangan Sentuh	757,18 V	651,20 V	OK
8	Jarak antar konduktor	10	10	OK
9	Jlh konduktor parallel sisi lebar	N/A	8	OK
10	Jlh konduktor parallel sisi panjang	N/A	15	OK
11	Lebar Area	71,5	71,5	OK
12	Panjang Area	141,8	141,8	OK
13	Luas Area	10.138,7	10.138,7	OK

4.8 Pemasangan sistem pembumian

Pemasangan sistem pembumian dilaksanakan dengan menggunakan data-data pada tabel (5). Langkah awal kegiatan ini adalah melakukan pekerjaan penggalian tanah diareal yang telah ditentukan dengan kedalaman galian 0,8 meter. Galian tanah dibuat secara melintang dan membujur, jumlah galian melintang pada sisi lebar parallel sebanyak 8 jalur dan membujur parallel sebanyak 15 jalur.



Gambar 7 : Galian tanah penanaman konduktor

Konduktor tembaga BCC 150 mm² di gelar (*laying*) kedalam galian, diurug menggunakan pasir setebal 15 cm selanjutnya di urug menggunakan tanah bekas galian (lihat gambar 4).

Pada setiap pertemuan konduktor di hubungkan menggunakan thermite cadweld, ujung tiap konduktor yang akan disambung ke peralatan di pasang sepatu kabel (*Cable Scoen*) dengan cara di press. Pada setiap sudut pertemuan konduktor yang membentuk persegi panjang di pasang batang pembumian (*grounding rod*) dengan cara disambung menggunakan thermite cadweld.



Gambar 8 : Sambungan konduktor menggunakan thermite cadweld

Pengukuran sistem pembumian dilakukan ketika pekerjaan mengubur konduktor selesai

dilaksanakan, yaitu pada titik sambungan konduktor yang dikeluarkan keatas permukaan tanah untuk disambungkan ke peralatan. Jika hasil pengukuran menggunakan alat ukur earth tester telah sesuai dengan hasil perhitungan dan memenuhi syarat, maka sistem pembumian ini dapat dihubungkan ke bagian metal peralatan yang pada saat beroperasi tidak di aliri arus listrik. Peralatan gardu induk yang disambungkan ke sistem pembumian yaitu;

- a. Tower gantry
- b. Transformer daya dan transformer distribusi
- c. Panel-panel control dan kubikel 20kV
- d. Peralatan fiber optic dan peralatan PLC
- e. Pemutus (circuit breker),
- f. Pemisah (disconnecting switch),
- g. Transformator arus (current transformer)
- h. Transformer tegangan (capasitiv voltage transformer),
- i. Bagian metal Penangkal petir (lightning arrester),
- j. Bagian metal resistor netral transformer daya (neutral grounding resistor)
- k. Pagar switchyard.



Gambar 9 : Penyambungan konduktor pembumian ke bagian metal peralatan dan pengukuran sistem pembumian

5. Kesimpulan

Hasil perhitungan yang dilakukan pada desain dan pemasangan sistem pembumian pada gardu induk baru Kotacane dapat disimpulkan bahwa;

- a. Luas penampang konduktor yang di gunakan, kedalaman konduktor yang di kubur dibawah permukaan tanah, jumlah panjang konduktor dan jumlah konduktor yang parallel sangat menentukan hasil resistansi mesh pembumian.
- b. Panjang konduktor dan jumlah batang pembumian yang makin besar maka akan menghasilkan nilai tahanan mesh (R_g) yang makin kecil.
- c. Nilai tahanan mesh (R_g) yang makin kecil akan menghasilkan tegangan gangguan ($GPR = \text{Grounding potensial rise}$) yang makin kecil.

- d. Tegangan mesh nyata (E_{mesh}) di pengaruhi oleh diameter konduktor (A_{mm}) yang digunakan dan jarak spasi konduktor (D), dimana (A_{mm}) dan (D) semakin besar maka (E_{mesh}) semakin kecil.
- e. Sedangkan tegangan langkah (E_{step}) di pengaruhi oleh jumlah konduktor parallel (N_M) dan (N_S) serta kedalaman konduktor (h) di tanam, dimana (N_M) dan (N_S) serta (h) makin besar maka (E_{step}) makin kecil.

6. Saran

Sistem pembumian yang terpasang pada areal gardu induk sebagai salah satu peralatan yang mutlak ada dan terpasang, selain untuk melindungi peralatan listrik tegangan tinggi juga sangat penting untuk melindungi keselamatan manusia yang ada pada area tersebut, maka dalam proses desain dan pemasangannya harus benar-benar baik dan sesuai standar yang ada, untuk itu perlu diperhatikan beberapa hal, sbb;

- a. Pemilihan material pembumian yang terdiri dari konduktor, batang pembumian (rod), material sambungan, clamp penyangga, sepatu kabel dan mur baut harus menggunakan material terbuat dari tembaga dengan daya hantar tinggi, kuat dan keras, tahan terhadap korosi.
- b. Hampanan lapisan batuan kerikil yang lazim di hampar di areal switchyard harus di perhatikan ketebalannya minimal 25 cm dengan besaran diameter yang seragam antara 3-5 cm untuk mendapatkan resistansi lapisan sebesar 3.000 Ohm, sebagai material pendukung komponen factor reduksi (C_s) sistem pembumian.
- c. Pada proses desain dan pemasangan sistem pembumian sebaiknya dilaksanakan oleh tenaga ahli berpengalaman dan bersertifikat dan menggunakan peralatan kerja standar baik sesuai dengan PUIL.

7. Daftar Pustaka

- A. Arismunandar, DR . MSc (1997) "*Teknik Tenaga Listrik*" Pradnya Paramita, Jakarta.
- Baldev, T tahun 1993 "*Effectif Ground Resistenace of Human Feet in High Voltage Switchyards*" standard IEEE Transactions on Power Deliver, Vol 8. No.1.

Hutauruk. T (1999) "*Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*" Erlangga, Jakarta

Institut of electrical and Electonic Engineers (IEEE) 80 - 1986 "*Guide For Safety in AC Substation grounding*"

Institut of electrical and Electonic Engineers (IEEE) 80 - 2000 "*Guide For Safety in AC Substation grounding*"

PT.PLN (persero) INKITRING SUAR (2011) "*Pembangunan Gardu Induk 150 kV Kotacane (1x30mVA) dan Brastagi (ext)*, Rencana kerja dan syarat- syarat Dokumen Kontrak No: 011.PJ.2011 tahun 2011, Medan

Standar SNI 04-0225-2000 *Persyaratan Umum Instalasi Litrik 2000* (PUIL 2000).