

repository.ub.ac

**PERANCANGAN SISTEM PENGETANAHAN PERALATAN
DI GARDU INDUK PLTU
IPP (INDEPENDENT POWER PRODUCER) KALTIM 3**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

JOVIE TRIAS AGUNG NUGROHO
NIM. 115060309111005 - 63

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
MALANG**

2014

LEMBAR PERSETUJUAN

**PERANCANGAN SISTEM PENGETANAHAN PERALATAN
DI GARDU INDUK PLTU
IPP (INDEPENDENT POWER PRODUCER) KALTIM 3**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

JOVIE TRIAS AGUNG NUGROHO

NIM. 115060309111005 – 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT.

NIP. 19600701 199002 1 001

Ir. Soemarwanto, MT.

NIP. 19500715 198003 1 002



LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN SISTEM PENGETANAHAN PERALATAN
DI GARDU INDUK PLTU
IPP (INDEPENDENT POWER PRODUCER) KALTIM 3**

Disusun oleh:

JOVIE TRIAS AGUNG NUGROHO

NIM. 115060309111005 – 63

**Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus
pada tanggal 20 Mei 2014**

Majelis Penguji :

Ir. Hery Purnomo, MT

NIP. 19550708 198212 1 001

Ir. Soeprapto, MT

NIP. 19561020 198903 1 001

Ir. Hari Santoso, M.S

NIP. 19531205 198503 1 001

Mengetahui :

Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D

NIP. 19741203 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan rahmat, taufik dan hidayah-Nya lah skripsi ini dapat diselesaikan.

Skripsi berjudul “PERANCANGAN SISTEM PENGETANAHAN PERALATAN DI GARDU INDUK PLTU IPP (*INDEPENDENT POWER PRODUCER*) KALTIM 3” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

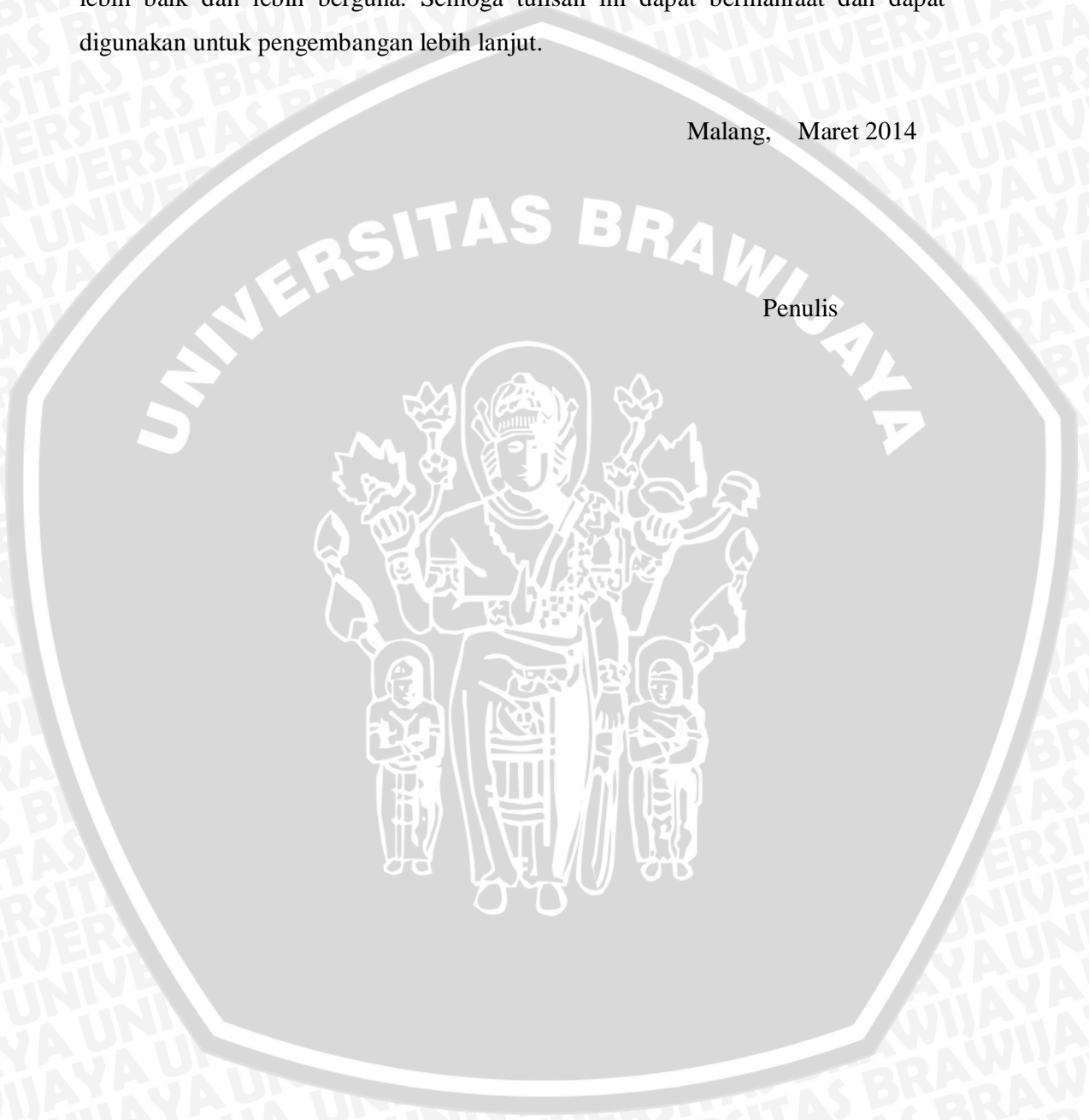
Menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan ketulusan dan kerendahan hati disampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak M.Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Sekertaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Mochammad Rif’an S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
5. Bapak Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT. selaku Dosen Pembimbing 1 atas segala bimbingan, nasehat, pengarahan, saran dan masukan yang telah diberikan,
6. Bapak Ir. Soemarwanto, MT. selaku Dosen Pembimbing 2 atas segala bimbingan, nasehat, pengarahan, saran dan masukan yang telah diberikan.
7. Bapak Ir. Wijono, MT., PhD. selaku dosen pembimbing akademik.
8. Ayahanda Her dan Ibunda Evie yang telah mendidik, memberi kasih sayang perhatian, motivasi dan doa beserta kakakku Wida dan Bagus yang telah memotivasi dan menghibur.
9. Bapak Ir. Suwanto Marsudi, MS selaku ketua UUK BPP FT UB atas bantuan data-data skripsi, Bapak Bayu, Mas Wahyu (ambon) serta pegawai PT. PLN PUSENLIS yang memberi data selama penelitian.
10. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Disadari bahwa skripsi ini belumlah sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu, saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan lebih berguna. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, Maret 2014

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Ruang Lingkup.....	3
1.4. Tujuan.....	3
1.5. Sistematika Pembahasan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Mengubah Dasar Dari Kuantitas Per Unit.....	5
2.2. Arus Gangguan Ketenah.....	6
2.2.1 Gangguan Satu Fasa Ke Tanah.....	8
2.2.2 Gangguan Dua Fasa Ke Tanah.....	9
2.2.3 Gangguan Tiga Fasa.....	10
2.3. Ukuran Konduktor.....	12
2.4. Arus Fibrillation.....	13
2.5. Tahanan Jenis Tanah dan Pengukuran.....	14
2.6. Sistem Pentanahan <i>Grid-Rod</i>	17
2.7. Tahanan Pentanahan.....	18
2.8. Bahaya- Bahaya yang timbul pada gangguan ketenah.....	20
2.8.1. Tegangan Sentuh.....	21
2.8.2. Tegangan Mesh (Tegangan Sentuh Sebenarnya).....	22

2.8.3. Tegangan Langkah.....	25
2.8.4. Tegangan Langkah Sebenarnya.....	26

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Studi Literatur.....	28
3.2. Pengambilan Data.....	28
3.3. Analisis.....	28
3.3.1. Analisis Tahanan Jenis Tanah.....	29
3.3.2. Analisis Arus Gangguan Ketanah.....	30
3.3.3. Analisis Perancangan Sistem Pengetanahan Peralatan.....	30
3.4. Penutup.....	30

BAB IV ANALISIS DAN PERANCANGAN

4.1. Gambaran Lokasi PLTU.....	31
4.2. Analisis Tahanan Jenis Tanah.....	32
4.1.1. Nilai Rata-Rata Tahanan Jenis Tiap Lapisan Tanah.....	33
4.3. Penentuan Perancangan Sistem Pengetanahan Peralatan.....	36
4.3.1. Penentuan Arus Gangguan Maksimum.....	36
4.3.2. Ukuran dan Jenis Konduktor Pengetanahan.....	43
4.3.3. Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh Yang Dijinkan	44
4.4. Analisis Perancangan Sistem Pengetanahan Peralatan.....	46
4.4.1. Tegangan Sentuh Maksimum.....	46
4.4.2. Tegangan Langkah Maksimum.....	48
4.4.3. Tahanan Pengetanahan.....	48

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan.....	56
5.2. Saran.....	57

DAFTAR PUSTAKA	58
-----------------------------	----

LAMPIRAN	59
-----------------------	----

DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Komponen-Komponen Urutan Positif	6
Gambar 2.2.	Komponen-Komponen Urutan Negatif.....	7
Gambar 2.3.	Komponen-Komponen Urutan Nol.....	7
Gambar 2.4.	Penjumlahan vektor dari urutan positif, urutan negatif dan urutan nol.....	7
Gambar 2.5.	Gangguan Satu Fasa Ke Tanah.....	8
Gambar 2.6.	Gangguan Dua Fasa Ke Tanah	9
Gambar 2.7.	Gangguan Tiga Fasa	10
Gambar 2.8.	Rangkaian Pengukuran Tahanan Jenis Tanah dengan Metoda 4 Titik.....	15
Gambar 2.9.	Penampang melintang (<i>cross section</i>) nilai resistivity.....	16
Gambar 2.10.	Pentanahan Sistem <i>Grid-Rod</i>	17
Gambar 2.11.	Grafik hubungan antara koefisien K_1 dan K_2 dengan perbandingan panjang dan lebar	19
Gambar 2.12.	(a) Tegangan sentuh dan (b) rangkaian penggantinya	21
Gambar 2.13.	(a) Tegangan langkah dan (b) rangkaian penggantinya	25
Gambar 3.1.	Diagram alir analisis tahanan jenis tanah	29
Gambar 3.2.	Blok diagram perancangan	30
Gambar 4.1.	Peta Lokasi PLTU IPP KALTIM 3.....	31
Gambar 4.2.	Layout PLTU IPP KALTIM 3.....	32
Gambar 4.3.	Topografi dan distribusi titik-titik ukur.....	33
Gambar 4.4.	Kurva-kurva <i>isoresistivity</i> dari hasil pengukuran geolistrik pada kedalaman 2 meter	34
Gambar 4.5.	Grafik rata-rata lapisan tanah berdasarkan perhitungan tahanan jenis tanah.	35
Gambar 4.6.	Diagram Garis Tunggal Unit Pembangkit Baru	37
Gambar 4.7.	Rangkaian ekivalen urutan positif pada gangguan di titik A_1	40
Gambar 4.8.	Rangkaian ekivalen urutan negatif pada gangguan di titik A_1	40
Gambar 4.9.	Rangkaian ekivalen urutan nol pada gangguan di titik A_1	41

Gambar 4.10. Perancangan *Grid-Rod* 1 (Awal) 50
Gambar 4.11. Perancangan *Grid-Rod* 2 51
Gambar 4.12. Grafik Tegangan Setiap Perbaikan Perancangan..... 54

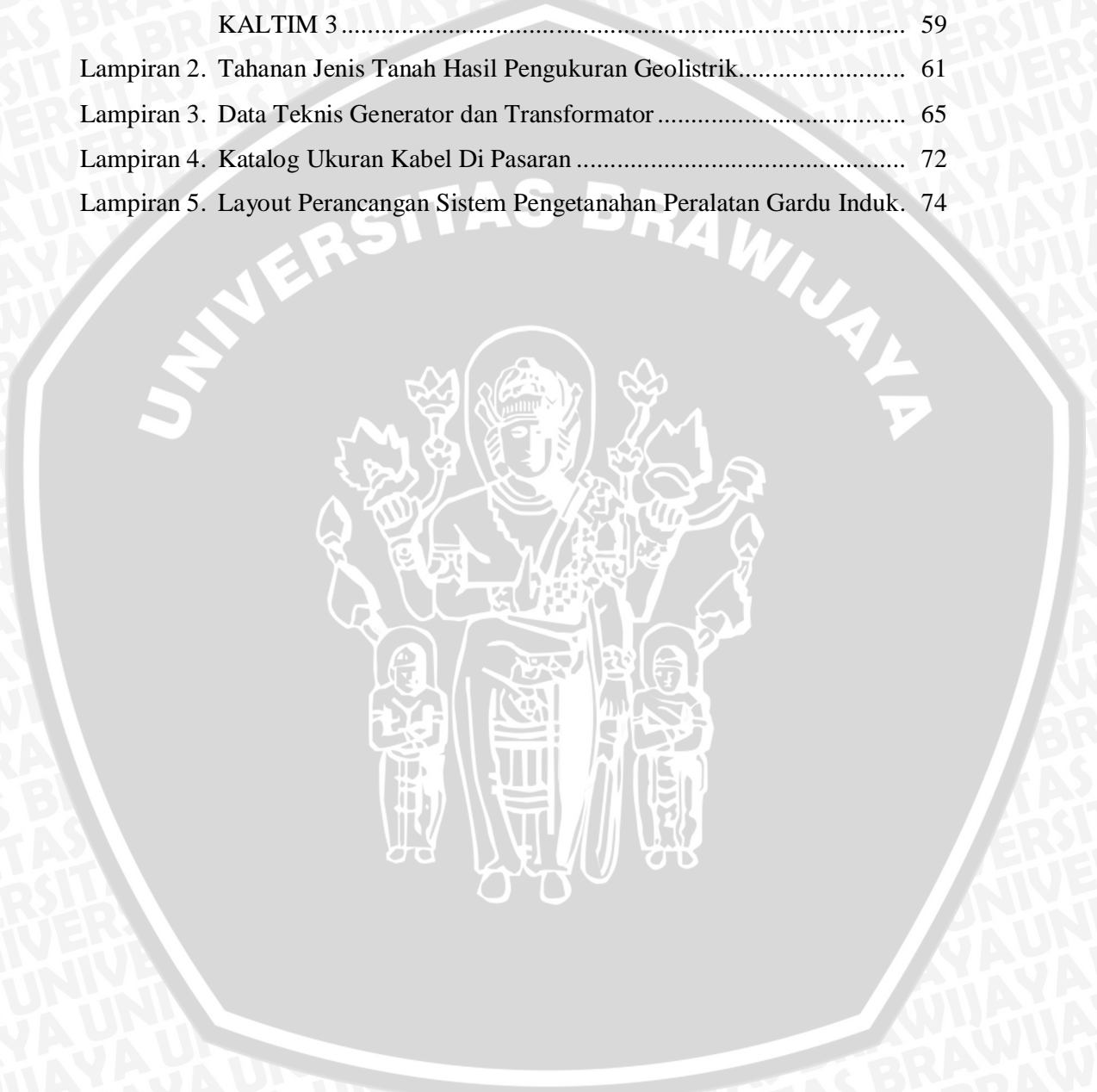


DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Berbagai macam hubungan transformator.....	11
Tabel 2.2.	Beberapa jenis material dan koefisiennya	12
Tabel 2.3.	Nilai-nilai tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah.....	15
Tabel 2.4.	Tegangan sentuh yang diijinkan dan lama gangguan dengan berat 50 kg dan ketebalan batu koral 10 cm.....	22
Tabel 2.5.	Tegangan langkah yang diijinkan dan lama gangguan dengan berat 50 kg dan ketebalan batu koral 10 cm.....	26
Tabel 4.1.	Lokasi pengukuran geolistrik.....	32
Tabel 4.2.	Tahanan jenis lapisan tanah pada kedalaman tertentu.....	34
Tabel 4.3.	Data generator	37
Tabel 4.4.	Data transformator.....	38
Tabel 4.5.	Nilai impedansi urutan tiap komponen.....	39
Tabel 4.6.	Nilai impedansi urutan ekivalen untuk titik gangguan A dan B.....	42
Tabel 4.7.	Hasil perhitungan arus gangguan disetiap titik gangguan.....	43
Tabel 4.8.	Tegangan sentuh dan langkah yang diijinkan pada seseorang dengan berat 50 dan 70 kg untuk masing-masing ketebalan batu koral.....	45
Tabel 4.9.	Data perancangan setiap proses perbaikan	52
Tabel 4.10.	Perhitungan Tegangan Langkah, Tegangan Sentuh dan Tahanan Pengetanahan Setiap Perbaikan Perancangan.....	52
Tabel 4.11.	Perhitungan Tegangan Langkah, Tegangan Sentuh dan Tahanan Pengetanahan Dengan Mengganti Ukuran Konduktor.....	53
Tabel 4.12.	Data lengkap hasil perancangan sistem pengetanahan peralatan untuk Gardu Induk baru (Perancangan <i>Grid-Rod</i> 4).....	55

DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Layout PLTU IPP (<i>INDEPENDENT POWER PRODUCER</i>)	
	KALTIM 3	59
Lampiran 2.	Tahanan Jenis Tanah Hasil Pengukuran Geolistrik.....	61
Lampiran 3.	Data Teknis Generator dan Transformator	65
Lampiran 4.	Katalog Ukuran Kabel Di Pasaran	72
Lampiran 5.	Layout Perancangan Sistem Pengetanahan Peralatan Gardu Induk.	74



RINGKASAN

Jovie Trias Agung Nugroho, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Maret 2014, **Perancangan Sistem Pengetanahan Peralatan Di Gardu Induk PLTU IPP (INDEPENDENT POWER PRODUCER) KALTIM 3**, Dosen Pembimbing : Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT dan Ir. Soemarwanto, MT

Pertumbuhan ekonomi di Indonesia cukup tinggi, yang mengakibatkan meningkatnya kebutuhan listrik dari tahun ke tahun. Sehingga penambahan pembangunan pembangkit listrik perlu dilakukan. Salah satu pembangunan proyek yang sedang dilaksanakan adalah PLTU (*Independent Power Producer*) IPP KALTIM 3 dengan kapasitas 2x100 MW. Pembangunan PLTU IPP KALTIM 3 ini akan di ikuti dengan pembangunan Gardu Induk. Gardu Induk ini harus dilengkapi sistem pengetanahan peralatan yang baik. Sistem pengetanahan peralatan tersebut digunakan untuk membatasi tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dapat membahayakan keselamatan dan keamanan manusia. Tegangan sentuh dan tegangan langkah tersebut disebabkan oleh arus gangguan yang mengalir ketanah.

Penelitian ini berisi tentang perancangan sistem pengetanahan peralatan di gardu induk PLTU IPP KALTIM 3. Pada perancangan ini menggunakan sistem pentanahan *grid-rod* dengan membuat kombinasi antara jumlah *grid* dan *rod* yang kedalaman penanaman konduktornya bergantung dari nilai tahanan jenis tanah serta luas area pentanahan yang akan digunakan. Dari hasil analisis dan perancangan sistem pengetanahan peralatan gardu induk untuk tahanan jenis tanah tertinggi di lokasi yang akan dibangun gardu induk sebesar 650 ohm-meter dengan asumsi tahanan jenis tanah tersebut *uniform*, arus gangguan maksimum ketanah sebesar 7371.72 ampere dan sistem pengetanahan peralatan berdasarkan tata letak peralatan terdapat 2 model perancangan. Dari proses perancangan sistem pengetanahan peralatan yang telah dilakukan, untuk ukuran diameter konduktor *grid* yang digunakan sebesar 20.25 mm dan ukuran diameter konduktor *rod* sebesar 16 mm. Dengan panjang konduktor *grid* (L_C) sepanjang 3386.6 meter, panjang konduktor *rod* (L_R) sepanjang 5472 meter dan ketebalan batu koral 0.12 meter, maka didapat tegangan sentuh (E_t) sebesar 708.50 volt, tegangan langkah (E_s) sebesar 829.78 volt dan tahanan pengetanahan (R_g) sebesar 3.936 ohm. Sehingga perancangan pengetanahan peralatan ini masih aman bagi manusia dengan tegangan sentuh maksimum sebesar 712.6 volt dan tegangan langkah maksimum sebesar 2379.3 volt.

Kata Kunci – Pentanahan, Gardu Induk, Arus Gangguan Ketanah, Tegangan Sentuh, Tegangan Langkah, Tahanan Pengetanahan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kalimantan Timur merupakan daerah dengan pertumbuhan ekonomi tinggi di kawasan timur Indonesia yang mengakibatkan meningkatnya kebutuhan listrik dari tahun ke tahun. Peningkatan penggunaan energi tak terbarukan akhir-akhir ini menyebabkan cadangan energi yang ada menipis dengan pesat dan seringnya terjadi pemadaman listrik. Hal ini diperparah dengan pemakaian potensi energi minyak bumi yang cenderung boros dalam penggunaannya. Saat ini konsumsi energi listrik di Kalimantan Timur sebagian besar bergantung pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). Sehingga penambahan pembangunan pembangkit listrik dirasakan perlu dilakukan. Pembangunan proyek PLTU tersebut guna mengejar pasokan tenaga listrik yang akan mengalami defisit sampai beberapa tahun mendatang, serta menunjang program diversifikasi energi untuk pembangkit tenaga listrik ke non bahan bakar minyak (BBM) dengan memanfaatkan batubara berkalori rendah yaitu 4200 kcal/kg (Dianti Nugrahni, 2005). Salah satu pembangunan proyek yang sedang dilaksanakan adalah PLTU (*Independent Power Producer*) IPP KALTIM 3 dengan kapasitas 2x100 MW yang berlokasi di desa/kelurahan Tamapole Kecamatan Muara Jawa Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur.

Pada pembangunan PLTU IPP KALTIM 3 ini akan diikuti dengan pembangunan Gardu Induk. Gardu Induk merupakan suatu sistem instalasi listrik yang terdiri dari beberapa peralatan listrik dan menjadi penghubung listrik dari pembangkit ke jaringan transmisi yang selanjutnya disalurkan ke jaringan distribusi primer dan berfungsi sebagai penyalur daya dengan kapasitas sesuai dengan tegangan operasinya. Didalam Gardu Induk terdapat peralatan-peralatan seperti *Current Transformer (CT)*, *Potential Transformer (PT)*, *Circuit Breaker (CB)*, *Disconnecting Switch (DS)*, *Earthing Switch (ES)*, *Busbar*, *Control Local Panel*, dan peralatan-peralatan lainnya. Gardu Induk baru harus dilengkapi dengan sistem pengetanahan peralatan yang baik. Fungsi dari pengetanahan peralatan Gardu Induk

tersebut ialah untuk memperkecil nilai dari tahanan pentanahan, membatasi tegangan yang timbul antara peralatan, peralatan dengan tanah dan meratakan gradien tegangan yang timbul pada permukaan tanah akibat arus gangguan yang mengalir dalam tanah. Arus gangguan ini dapat menimbulkan bahaya pada saat terjadi gangguan karena arus gangguan ini akan mengalir pada bagian-bagian peralatan yang terbuat dari metal dan juga mengalir dalam tanah di sekitar Gardu Induk. Arus gangguan tanah yang mengalir di tempat gangguan maupun di tempat pengetanahan Gardu Induk menimbulkan tegangan di permukaan tanah yang dapat mengakibatkan terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang melampaui batas-batas keselamatan manusia yang diijinkan.

Atas dasar latar belakang tersebut, maka dalam skripsi ini akan dilakukan perhitungan untuk menganalisis nilai dari tahanan pentanahan, tegangan sentuh dan tegangan langkah guna memenuhi standar keselamatan manusia yang telah ditentukan serta memperkecil tegangan permukaan tanah sehingga tegangan permukaan yang timbul tidak membahayakan baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan ketanah. Sistem pentanahan yang digunakan adalah *sistem grid-rod*, dimana sistem pentanahan *grid* dilakukan dengan cara menanamkan batang-batang konduktor sejajar dengan permukaan tanah pada kedalaman tertentu dan dibantu dengan batang-batang vertikal/*rod*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada latar belakang, maka rumusan masalah yang dibahas pada skripsi ini adalah :

1. Berapa kedalaman efektif elektroda batang/rod berdasarkan pada analisis resistivitas tanah.
2. Berapa besar arus gangguan ketanah untuk perancangan sistem pengetanahan peralatan di Gardu Induk PLTU IPP KALTIM 3.
3. Bagaimana sistem pengetanahan peralatan di Gardu Induk PLTU IPP KALTIM 3 dengan kapasitas 2x100 MW.

1.3 Ruang Lingkup

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka pembahasan dibatasi pada:

1. Sistem pentanahan yang dirancang adalah sistem pengetanahan *Grid-Rod* dengan kedalaman pengetanahan *grid* 1 meter.
2. Menentukan arus gangguan ketanah paling besar pada peralatan di Gardu Induk PLTU IPP KALTIM 3 dengan kapasitas 2 x 100 MW.
3. Menentukan dimensi dan jumlah konduktor pentanahan yang di perlukan dalam perancangan sistem pengetanahan peralatan.
4. Menghitung tegangan langkah dan tegangan sentuh sesuai dengan standar yang di ijinakan.

1.4 Tujuan

Tujuan dari pembahasan skripsi ini adalah untuk merancang sistem pengentanahan peralatan di Gardu Induk PLTU IPP KALTIM 3, guna memenuhi kriteria tegangan langkah dan tegangan sentuh yang diijinkan sehingga tegangan permukaan yang timbul tidak membahayakan makhluk hidup baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan ketanah.

1.5 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I : Memuat latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika pembahasan.

BAB II : Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

BAB III : Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam skripsi ini, meliputi metode pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data.

BAB IV : Berisi mengenai perancangan sistem pengetanahan peralatan yang akan dirancang pada Gardu Induk PLTU IPP KALTIM 3 (2X100MW).

BAB V : Berisi kesimpulan dan saran dari hasil analisis.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mengubah Dasar Dari Kuantitas Per Unit

Sebelum menghitung arus gangguan yang terjadi biasanya impedansi per unit untuk suatu komponen dari suatu sistem dinyatakan menurut suatu dasar yang berbeda dengan dasar yang dipilih untuk bagian dari sistem dimana komponen tersebut berada. Karena itu untuk mengubah dari impedansi per unit menurut suatu dasar yang di berikan menjadi impedansi per unit menurut suatu dasar yang baru, dapat menggunakan Persamaan (2-1) (Stevenson,1984:39) sebagai berikut:

$$Z_{baru}(p.u) = Z_{lama}(p.u) \times \left(\frac{V_{dasar\ lama}(kV)}{V_{dasar\ baru}(kV)} \right)^2 \times \left(\frac{S_{dasar\ baru}(kVA)}{S_{dasar\ lama}(kVA)} \right) \quad (2-1)$$

Dengan impedansi dasar yang baru kita juga membutuhkan arus dasar baru untuk menghitung nilai-nilai tiga fasa untuk kilovolt dasar dan kilovoltampere dasar. Sehingga dengan kata lain bahwa kilovoltampere dasar dan tegangan dasar dalam kilovolt berturut-turut sama dengan kilovoltampere dasar untuk total tiga fasa dan tegangan dasar antar saluran, maka di peroleh persamaan (2-2) (Stevenson,1984:37) sebagai berikut :

$$I_{dasar}(A) = \frac{S_{dasar\ baru}(kVA)}{\sqrt{3} V_{dasar\ baru}(kV)} \quad (2-2)$$

dengan :

- Z : Nilai impedansi (p.u)
- $V_{dasar\ lama}$: Tegangan dasar yang ada pada nameplate (kV)
- $V_{dasar\ baru}$: Tegangan dasar yang baru untuk dasar perhitungan L-L (kV)
- $S_{dasar\ lama}$: Rating daya dasar yang ada pada nameplate (kVA)
- $S_{dasar\ baru}$: Rating daya dasar yang baru untuk dasar perhitungan (kVA)

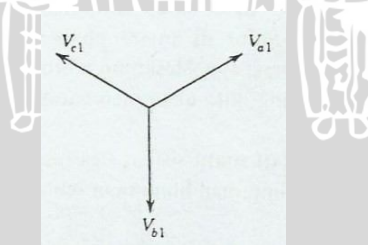
2.2 Arus Gangguan Ke Tanah

Arus gangguan ke tanah yang mengalir ditempat gangguan maupun ditempat pengetanahan Gardu Induk menimbulkan perbedaan tegangan di permukaan tanah yang dapat mengakibatkan terjadinya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dapat melampaui batas-batas keamanan manusia dan binatang (Hutauruk, 1999:148). Maka dari itu, besarnya arus gangguan ke tanah yang terjadi berpengaruh besar dalam penentuan perancangan sistem pengetanahan peralatan.

Dalam sistem tenaga listrik terdapat tiga jenis arus gangguan ke tanah antara lain adalah gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah, dan gangguan tiga fasa ke tanah. Berdasarkan IEEE std 80 penentuan arus gangguan yang akan digunakan untuk merancang sistem pengetanahan berdasarkan besarnya nilai arus gangguan tanah terbesar yang terjadi dan seringnya terjadi arus gangguan ke tanah tersebut. IEEE membatasi analisis arus gangguan ke tanah berdasarkan seringnya gangguan yaitu gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah.

Besarnya arus gangguan sangat bergantung pada nilai dari komponen urutan sistem tersebut. Dengan adanya rangkaian impedansi urutan ini, arus gangguan ke tanah terbesar yang terjadi di suatu titik pada sistem dapat dicari yaitu dengan mendapatkan nilai penyederhanaan dari impedansi ekivalen urutannya.

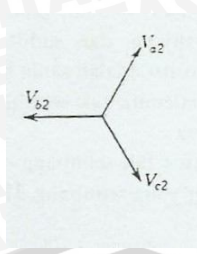
Komponen urutan positif terdiri dari 3 fasor yang sama besarnya dan saling berbeda fasa sebesar 120^0 satu sama lainnya (urutan sama dengan fasor aslinya). Adapun vektor untuk urutan positif ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Komponen-Komponen Urutan Positif

Sumber : Stevenson, 1984 : 302

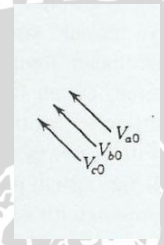
Komponen urutan negatif terdiri dari 3 fasor yang sama besarnya dan saling berbeda fasa sebesar 120^0 satu sama lainnya (urutan berlawanan dengan fasor aslinya). Adapun vektor untuk urutan negatif ditunjukkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Komponen-Komponen Urutan Negatif

Sumber : Stevenson, 1984 : 302

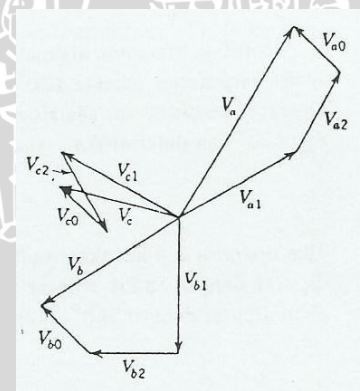
Komponen urutan nol terdiri dari 3 fasor yang sama dan sefasa. Adapun vektor untuk urutan nol ditunjukkan pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Komponen-Komponen Urutan Nol

Sumber : Stevenson, 1984 : 302

Sehingga penjumlahan secara grafis komponen-komponen untuk mendapatkan tiga fasor-fasor tak seimbang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.4

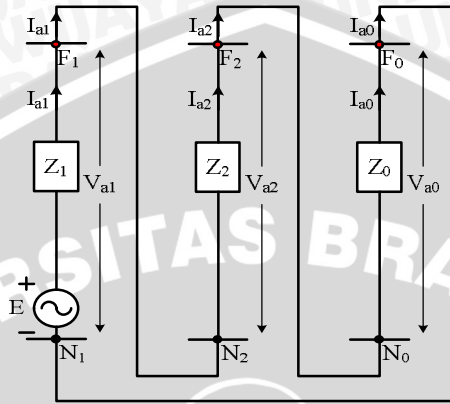


Gambar 2.4 Penjumlahan vektor dari urutan positif, urutan negatif dan urutan nol

Sumber : Stevenson, 1984 : 302

2.2.1 Gangguan Satu Fasa Ke Tanah

Gangguan satu fasa ke tanah merupakan gangguan yang paling sering terjadi, baik pada suatu sistem daya listrik (Hutauruk, 1999). Adapun Gambar 2.5 menunjukkan gangguan satu fasa ke tanah.



Gambar 2.5. Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Sumber : Sulasno, 1993 : 184

Besar arus gangguan satu fasa ke tanah pada fasa a adalah : (Sulasno, 1993 : 183)

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_a}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \quad (2-3)$$

Karena :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}, \text{ sehingga } I_a = 3 I_{a1} \quad (2-4)$$

Maka besar arus gangguan ke tanahnya :

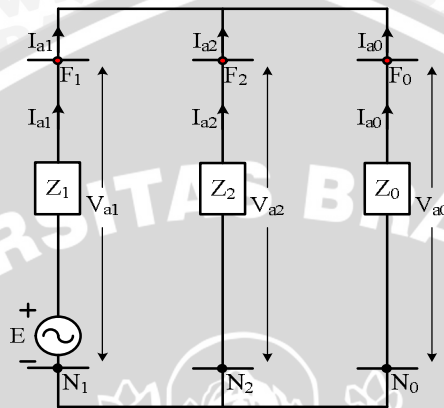
$$I_f = I_a = \frac{3E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \quad (2-5)$$

Keadaan khusus bila titik netral Pembangkit tidak ditanahkan ($Z_0 = \sim$) :

$$I_f = I_a = \frac{3E}{(Z_1 + Z_2 + \sim)} = \frac{3E}{\sim} = 0 \quad (2-6)$$

2.2.2 Gangguan Dua Fasa Ke Tanah

Pada gangguan dua fasa ke tanah, besarnya arus gangguan selain ditentukan oleh komponen –komponen urutan positif dan urutan negatif, juga ditentukan oleh besarnya komponen urutan nol, karena gangguan tersebut ke tanah. Adapun Gambar 2.6 menunjukkan gangguan dua fasa ke tanah.



Gambar 2.6. Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Sumber : Sulasno, 1993 : 195

Besar arus gangguan dua fasa ke tanah, contoh pada fasa b dan c (Sulasno, 1993 : 196) adalah :

$$I_{a1} = E_a / (Z_1 + (Z_2 // Z_0)) \tag{2-7}$$

$$I_{a2} = - \left(\frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \right) \times I_{a1} \tag{2-8}$$

$$I_{a0} = - \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \right) \times I_{a1} \tag{2-9}$$

Karena :

$$I_a = 0 \tag{2-10}$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \tag{2-11}$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \tag{2-12}$$

Maka besar arus gangguan ke tanahnya :

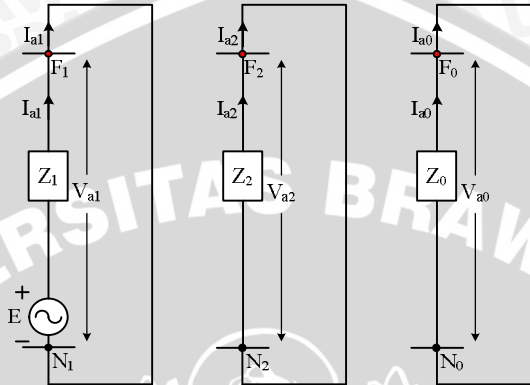
$$I_f = I_b + I_c \text{ atau } I_f = 3I_{a0} \tag{2-13}$$

Keadaan khusus bila titik netral Pembangkit tidak ditanahkan ($Z_0 = \infty$) :

$$I_f = I_b + I_c = 0 \tag{2-14}$$

2.2.3 Gangguan Tiga Fasa

Pada gangguan tiga fasa, besarnya arus gangguan dapat lebih kecil dari pada gangguan satu fasa maupun dua fasa dikarenakan impedansi urutan nol pada titik gangguan lebih kecil daripada impedansi urutan positif dan urutan negatif. Adapun Gambar 2.7 menunjukkan gangguan tiga fasa.



Gambar 2.7. Gangguan Tiga Fasa

Sumber : Paul M. Anderson, 1995 : 51

Besar arus gangguan tiga fasa terjadi pada fasa a, b dan c (Sulasno, 1993 : 201) adalah :

$$I_f = I_a = I_b = I_c = E / Z_1 \quad (2-15)$$

dengan

E : Tegangan fasa pembangkit atau generator

I_f : Arus gangguan ke tanah

I_a : Arus yang mengalir pada fasa a

I_b : Arus yang mengalir pada fasa b

I_c : Arus yang mengalir pada fasa c

Z_1 : Impedansi Urutan Positif

Z_2 : Impedansi Urutan Negatif

Z_0 : Impedansi Urutan Nol

Persamaan (2-15) menunjukkan bahwa arus pada keadaan gangguan tiga fasa ke tanah tidak mengandung unsur arus urutan nol maupun impedansi netral, sehingga sistem pentanahan netral pada gangguan tersebut tidak ada pengaruhnya.

Gangguan tiga fasa maupun tiga fasa ketanah ini merupakan gangguan yang paling jarang terjadi pada sistem daya listrik

Impedansi urutan positif dan negatif biasanya memiliki nilai yang identik. Sedangkan untuk rangkaian ekuivalen urutan nol untuk transformator tiga fasa perlu diperhatikan khusus. Berbagai kombinasi yang mungkin dari gulungan primer dan sekunder yang terhubung Y atau Δ akan mengubah pula jaringan urutan nolnya. Berbagai kombinasi hubungan transformator diperlihatkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Berbagai macam hubungan Transformator

CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

Sumber : Stevenson, 1984 : 327

2.3 Ukuran Konduktor

Untuk ukuran penghantar yang mampu menahan besarnya titik lebur sehingga dirancang menggunakan penghantar tembaga yang solid, maka luas penampang konduktor minimum pengetanahan dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2-16). (IEEE Std 80, 2000:23)

$$A = I_f \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_f \cdot a_r \cdot Pr}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}} \quad (2-16)$$

Tabel 2.2 Beberapa Jenis Material dan koefisiennya:

Description	Material conductivity (%)	α_r factor at 20 °C (1/°C)	K_o at 0 °C (0 °C)	Fusing ^a temperature T_m (°C)	ρ_r 20 °C ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	TCAP thermal capacity [J/(cm ³ ·°C)]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod ^b	20.0	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.004 03	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.001 60	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod ^c	9.8	0.001 60	605	1400	17.50	4.44
Zinc coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.03

Sumber :IEEE std 80, 2000 : 42.

dengan :

- A : Ukuran kawat penghantar (mm^2)
 I_f : Arus gangguan ke tanah terbesar (A)
 t_f : lama waktu gangguan (detik)
 T_m : suhu terbesar konduktor tembaga yang diijinkan ($^{\circ}\text{C}$)
 T_a : suhu sekeliling tahunan terbesar ($^{\circ}\text{C}$)
 T_r : suhu referensi untuk konstanta material ($^{\circ}\text{C}$)
 a_o : koefisien panas tahanan jenis pada 0°C ($1/^{\circ}\text{C}$)
 a_r : koefisien panas tahanan jenis pada suhu referensi T_r ($1/^{\circ}\text{C}$)
 ρ_r : tahanan jenis konduktor pada suhu referensi ($\mu\Omega\text{-cm}$)
 K_o : $1/a_o$ ($^{\circ}\text{C}$)
 TCAP : kapasitas panas per unit volume ($\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$)

2.4 Arus Fibrillation

Arus Fibrilasi adalah arus yang dapat menyebabkan kerja otot jantung berhenti bekerja (*ventricular fibrillation*) yang berakibat pingsan hingga kematian. Tegangan sentuh dan tegangan langkah besarnya harus dibatasi agar arus yang mengalir ke dalam tubuh manusia tidak melebihi nilai arus fibrilasi dalam waktu tertentu. Lama dan besarnya arus fibrilasi yang diijinkan tergantung pada berat tubuh seseorang. Dari hasil percobaan yang telah dilakukan Dalziel disimpulkan bahwa orang dengan berat 50 kg masih dapat bertahan terhadap besar arus dan waktu yang ditentukan oleh Persamaan (2-17). (Hutaauruk, 1999:135)

$$I_k^2 \cdot t_f = K \quad \text{atau} \quad I_k = \frac{k}{\sqrt{t_f}} \quad (2-17)$$

dengan :

- I_k : Besar arus yang melalui tubuh manusia (A)
 t_f : Durasi/lama gangguan (waktu pemutusan), (s)
 K : Konstanta energi kejutan
 k : \sqrt{K}
 k_{50} : 0,116 A (untuk manusia dengan berat 50 kg)
 k_{70} : 0,157 A (untuk manusia dengan berat 70 kg)

Lama waktu gangguan (t_f) tergantung dari beberapa faktor, yaitu stabilitas sistem, tipe *Switchyard*, tipe rele dan pemutus daya (CB) yang digunakan. Waktu yang dianggap realistis berkisar antara 0.5 detik sampai 1.0 detik. Umumnya waktu (t_f) terdiri dari waktu CB bekerja membutuhkan 0.06 detik dan waktu rele beroperasi membutuhkan 0.2 detik atau total waktu yang dibutuhkan untuk membebaskan gangguan adalah 0.26 detik. Dengan memberikan faktor keamanan 2 hingga 3 kali, maka waktu (t_f) dapat diambil rentang 0.52 – 0.78 detik. Jadi pengambilan waktu (t_f) sebesar 0.52 detik atau 0.75 detik adalah realistis. (Hutauruk, 1999:149)

IEEE membatasi pemilihan lama waktu gangguan (t_f) antara 0.25 detik sampai 1 detik. (IEEE std 80, 2000:87)

2.5 Tahanan Jenis Tanah dan Pengukurannya

Dalam membuat suatu perancangan pengetanahan peralatan di Gardu Induk, perlu dilakukan survei lapangan untuk mengetahui komposisi tanah pada tempat gardu induk tersebut akan dibangun, karena hal ini sangat berhubungan dengan nilai tahanan pengetanahan peralatan tersebut. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi harga tahanan pengetanahan, antara lain: sifat geologi tanah, komposisi zat kimia dalam tanah, kandungan air tanah, temperatur tanah, selain itu faktor perubahan musim juga mempengaruhinya.

Sifat geologi tanah merupakan factor utama yang menentukan tahanan jenis tanah. Bahan dasar daripada tanah relatif bersifat bukan penghantar. Tanah liat umumnya mempunyai tahanan jenis terendah, sedang batu-batuan dan *quartz* bersifat sebagai insulator. Berdasarkan nilai tahanan jenis tanah tersebut, maka selanjutnya dibuat Tabel 2.3 dari berbagai jenis tanah.

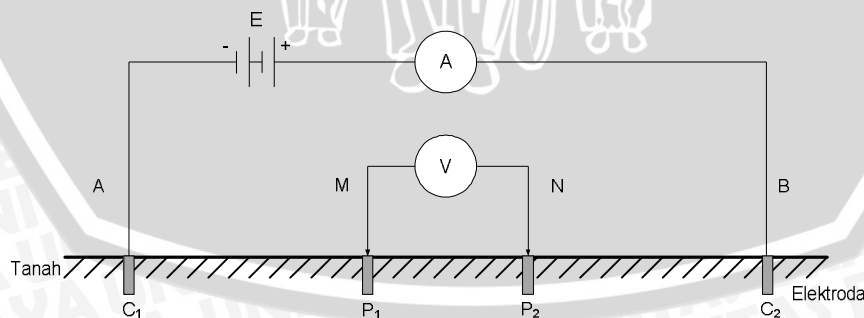
Tabel 2.3. Nilai-nilai tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah

No	Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah (ohm-meter)
1	Rawa	30
2	Tanah Liat	100
3	Pasir Basah	200
4	Batu-Batu Kerikil Kering	500
5	Pasir dan Batu Kerikil Kering	1000
6	Batu	3000

Sumber : PUIL 2000

Pengukuran tahanan jenis tanah dapat dilakukan berbagai cara, salah satunya adalah menggunakan metode geolistrik tahanan jenis. Dalam penelitian ini menggunakan konfigurasi Schlumberger, dimana pada konfigurasi Schlumberger ini elektroda-elektroda potensial diam pada suatu tempat pada garis sentral AB sedangkan elektroda-elektroda arus digerakkan secara simetri ke arah keluar dalam jarak tertentu dan sama.

Sebagai contoh mula-mula diambil jarak MN 1 m dan pembacaan dilakukan untuk setiap AB dengan jarak 15 m, 25 m, 35 m, 45 m, 55 m, 65 m, 75 m, 85 m, 105 m, 115 m, 125 m, 135 m, 145 m dan seterusnya bergantung kebutuhan. Semakin lebar jarak AB, maka semakin dalam jangkauan geolistrik ke dalam tanah. Jika kemudian potensial antara elektroda-elektroda terlalu kecil, maka jarak MN dapat di perbesar. Adapun rangkaian pengukuran tahanan ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8. Rangkaian Pengukuran Tahanan Jenis Tanah dengan Metoda 4 Titik

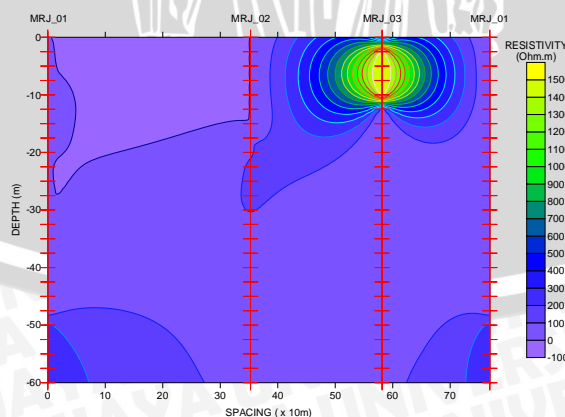
Sumber : Hutaaruk, 1999:142

Data yang diperlukan untuk pengukuran resistivitas tanah meliputi:

- Jarak antara dua elektroda arus (AB).
Jarak ini diubah-ubah untuk memperoleh gambaran tiap-tiap lapisan. Semakin jauh jarak antara elektroda arus, maka semakin dalam pula alat geolistrik dapat mendeteksi aquifer air tanah dibawahnya (juga bergantung pada besarnya arus yang diinjeksikan).
- Jarak antara dua elektroda potensial (MN).
- Arus listrik (I) yang diinjeksikan ke dalam tanah.
- Beda potensial (ΔV) antara kedua elektroda potensial.
- Dari dua data AB dan MN ini akan di peroleh nilai faktor koreksi geometri (K) dan dapat di turunkan nilai tahanan jenis (ρ).

Pengukuran ini dilakukan untuk beberapa titik sounding dengan tujuan memperoleh informasi yang cukup bagi analisis, permodelan dan interpretasi datanya. Analisis dan interpretasi dapat dilakukan dengan dua cara yaitu manual dan komputer.

Pada penelitian ini menggunakan komputer dengan bantuan software, dimana software ini merupakan program yang dibuat untuk menghitung serta menggambarkan nilai resistivitas dari hasil perhitungan di lapangan. Dengan memasukkan data nilai arus dan beda potensial, kita bisa melihat nilai resistivitasnya. Hasil pengolahan data ini adalah didapat kurve-kurve *isoresistivity* pada setiap lapisan. Contoh hasil dari pengolahan data geolistrik diperlihatkan seperti Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Penampang melintang (*cross section*) nilai resistivity

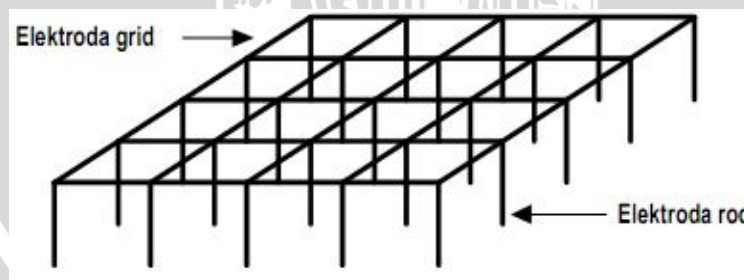
Sumber : Laporan Praktikum Geofisika, 2012:15

2.6 Sistem Pentanahan *Grid-Rod*

Peralatan gardu induk sebaiknya dipasang pentanahan sistem *grid-rod* dengan penghantar yang besar berguna untuk memperkecil tahanan pentanahan dan batasan tegangan diantara peralatan dan permukaan tanah pada nilai yang diijinkan. Pentanahan *grid-rod* merupakan salah satu sistem pentanahan yang banyak digunakan pada gardu induk karena mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan sistem pentanahan lainnya. Beberapa keuntungan tersebut antara lain *gradien* tegangan pada sistem pentanahan *grid* akan lebih rata serta tahanan pentanahan yang lebih kecil.

Sistem pentanahan *grid-rod* dilakukan dengan cara menanamkan batang-batang elektroda pada kedalaman tertentu. Kedalaman penanaman konduktor biasanya diantara 0.5 sampai 1.5 meter. Batang-batang elektroda tersebut terhubung satu dengan yang lainnya menggunakan konduktor, sehingga membentuk beberapa buah mesh dengan jarak antar konduktor 2 meter atau lebih dan dibantu dengan batang-batang vertikal/*rod*. Distribusi tegangan tergantung pada jarak elektroda paralel, makin besar jarak elektroda maka pendistribusian tegangannya makin tidak rata dan makin dekat jarak elektroda paralel maka pendistribusian tegangannya semakin merata. (IEEE std 80, 2000:88)

Adapun bentuk dari pentanahan sistem *grid-rod* dapat dilihat pada Gambar 2.10 berikut :



Gambar 2.10. Pentanahan Sistem *Grid-Rod*

Sumber :IEEE std 80, 2000 : 168

2.7 Tahanan Pentanahan

Pembumian yang ideal harus memberikan nilai tahanan pembumian mendekati nol atau ≤ 1 ohm untuk gardu induk bertegangan tinggi. Pada skripsi ini menggunakan gabungan antara *grid* dan batang *rod* untuk tanah yang seragam. Menurut Schwarz's nilai tahanan sistem pengetanahan gabungan / *Grid-Rod* (R_g) dapat ditentukan dengan cara menentukan terlebih dahulu tahanan pengetanahan *Grid* (R_1), tahanan pengetanahan *Rod* (R_2) dan tahanan pengetanahan bersama (R_m) sebagai berikut: (IEEE std 80-2000:66)

Tahanan pengetanahan *grid* (R_1) menggunakan Persamaan (2-18)

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{K_1 \times L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (2-18)$$

Tahanan pengetanahan *rod* (R_2) menggunakan Persamaan (2-19)

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[\ln \left(\frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 \times L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (2-19)$$

Tahanan pengetanahan bersama (R_m) menggunakan Persamaan (2-20)

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{K_1 \times L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (2-20)$$

Sehingga total untuk nilai tahanan pengetanahan untuk sistem gabungan / *Grid-Rod* (R_g) dapat menggunakan Persamaan (2-21).

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (2-21)$$

dengan :

R_g : Tahanan pengetanahan (Ω)

ρ : Tahanan jenis tanah (Ω -m)

L_C : Panjang total konduktor *grid* (m)

A : Luas area sistem pengetanahan (m^2)

L_R : Panjang total konduktor *rod* (m)

L_r : Panjang batang konduktor *rod* (m)

n_R : Jumlah konduktor batang / *rod*

a' : $\sqrt{a \times 2h}$, untuk konduktor yang ditanam pada kedalaman h

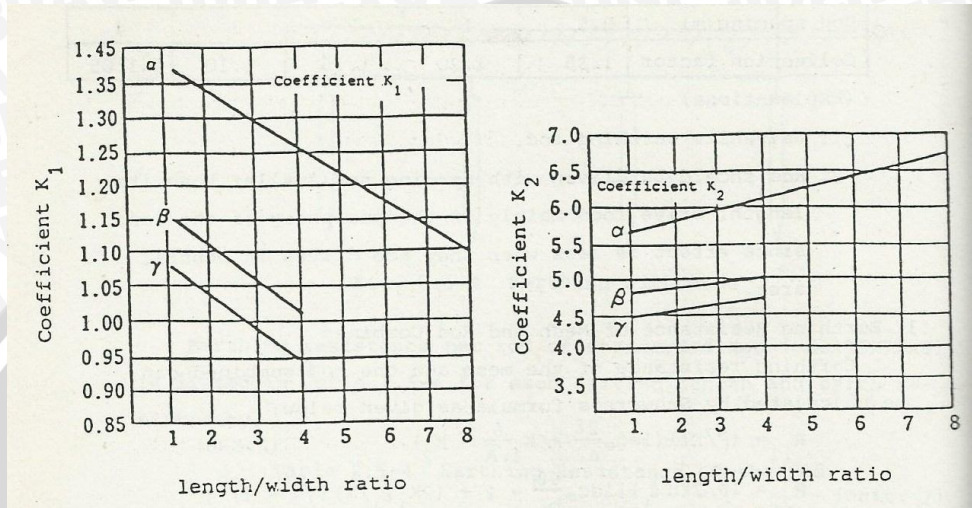
h : Kedalaman penanaman konduktor (m)

a : Diameter konduktor pengetanahan *grid* (m)

b : Diameter konduktor pengetanahan *rod* (m)

K₁ dan K₂ : Koefisien yang tergantung dari perbandingan panjang dan lebar

(Gambar 2.11 Grafik Koefisien K₁ dan K₂)



Gambar 2.11 Grafik hubungan antara koefisien K₁ dan K₂ dengan perbandingan panjang dan lebar

Sumber : The New Japan Engineering Consultants, 1989 : 128

Dengan :

α : Kurva untuk kedalaman $h = 0$

β : Kurva untuk kedalaman $h = \frac{1}{10} \sqrt{A}$

γ : Kurva untuk kedalaman $h = \frac{1}{6} \sqrt{A}$

2.8 Bahaya – Bahaya Yang Timbul Pada Gardu Induk Pada Keadaan Gangguan Tanah

Secara umum akan ditinjau bahaya – bahaya yang mungkin ditimbulkan oleh tegangan atau arus listrik terhadap manusia mulai dari yang ringan sampai paling yang berat yaitu pingsan atau mati.

Ringan atau berat bahaya yang timbul, tergantung dari faktor – faktor dibawah ini sebagai berikut: (Hutauruk, 1999:129)

- a. Tegangan dan kondisi orang terhadap tegangan tersebut.
- b. Besarnya arus yang melewati tubuh manusia.
- c. Jenis arus, searah atau bolak – balik.

Pada sistem tegangan tinggi sering terjadi kecelakaan terhadap manusia, dalam hal terjadi tegangan kontak langsung atau dalam hal manusia berada didalam suatu daerah yang mempunyai *gradien* tegangan yang tinggi. Sebenarnya yang menyebabkan bahaya tersebut adalah besarnya arus yang mengalir dalam tubuh manusia.

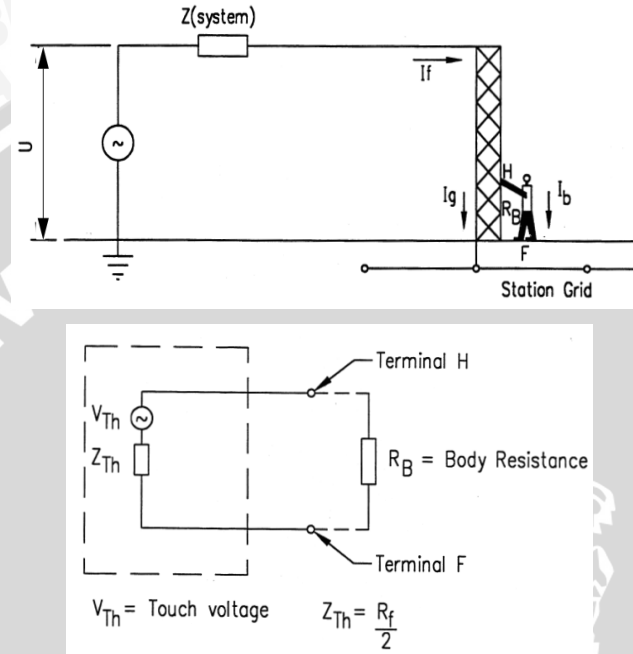
Arus gangguan ini akan mengalir melalui bagian – bagian peralatan yang terbuat dari logam dan juga mengalir dalam tanah disekitar gardu induk. Arus gangguan tersebut dapat menimbulkan *gradien* tegangan diantara peralatan, peralatan dengan tanah dan juga gradien tegangan pada permukaan tanah itu sendiri. Untuk menganalisis lebih lanjut akan ditinjau beberapa kemungkinan terjadinya tegangan dan kondisi orang yang sedang berada di dalam dan sekitar gardu induk tersebut.

Untuk menganalisa keadaan ini maka diambil beberapa pendekatan sesuai dengan kondisi orang yang sedang berada didalam atau sekitar gardu induk tersebut pada saat terjadi kesalahan ke tanah. Pada hakekatnya tegangan selama mengalirnya arus gangguan tanah dapat digambarkan sebagai berikut:

- a. Tegangan sentuh
- b. Tegangan Langkah

2.8.1 Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat diantara suatu obyek yang disentuh dan suatu titik berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan kisi-kisi pembumian yang berada di bawahnya, seperti yang terlihat pada Gambar 2.12 menurut IEEE 80 - 2000.



Gambar 2.12. (a) Tegangan sentuh dan (b) rangkaian penggantinya

Sumber : IEEE std 80, 2000 : 17

Manusia dengan berat badan 50 dan 70 Kg yang berada diantara satu objek dapat dihitung tegangan sentuh pada persamaan (2-22) dan (2-23) dibawah ini : (IEEE std 80,2000:27)

$$E_{t70} = (1000 + 1.5Cs \times \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \quad (2-22)$$

$$E_{t50} = (1000 + 1.5Cs \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \quad (2-23)$$

dengan :

E_{t50} : Tegangan sentuh untuk berat badan manusia 50 kg

E_{t70} : Tegangan sentuh untuk berat badan manusia 70 kg

C_s : Faktor reduksi nilai resistivitas permukaan tanah

ρ_s : Tahanan jenis permukaan material (lapisan batu koral), (Ohm-m)

t_f : Durasi/lama gangguan (waktu pemutusan), (s)

Apabila tidak ada pengaman (seperti lapisan batu koral) yang digunakan pada lapisan permukaan dimana $C_s = 1$ dan $\rho_s = \rho$. Nilai C_s dapat digunakan 5 % dari nilai analisis metode menurut Thapar, Gerez, and Kejriwal. Faktor reduksi dari nilai resistivitas permukaan tanah diformulasikan pada persamaan (2-24). (IEEE std 80, 2000:23)

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \right)}{2hs + 0.09} \quad (2-24)$$

Dengan :

- hs : Ketebalan lapisan batu koral antara 0.08 m sampai 0.15 m
- ρ : Tahanan jenis tanah ($\Omega.m$)
- ρ_s : Tahanan jenis permukaan material lapisan batu koral (3000 $\Omega.m$)

Tabel 2.4. Tegangan sentuh yang diijinkan dan lama gangguan dengan berat 50 kg dan ketebalan batu koral 10 cm

Lama Gangguan (t, detik)	Tegangan Sentuh yang Diijinkan (volt)
0.1	1,980
0.2	1,400
0.3	1,140
0.4	990
0.5	890
1.0	626
2.0	443
3.0	362

Sumber : Hutaaruk 1987 : 131.

2.8.2 Tegangan Mesh (Tegangan Sentuh Yang Sebenarnya)

Tegangan mesh merupakan salah satu bentuk tegangan sentuh. Tegangan mesh ini didefinisikan sebagai tegangan peralatan yang diketanahkan terhadap tengah-tengah daerah yang dibentuk konduktor *grid* (*center of mesh*) selama gangguan tanah.

Tegangan mesh ini menyatakan tegangan tertinggi yang mungkin timbul sebagai tegangan sentuh yang dapat dijumpai dalam sistem pengetanahan Gardu Induk, dan inilah yang diambil sebagai tegangan untuk perancangan aman.

Tegangan mesh dapat dihitung dengan Persamaan (2-25) sebagai berikut : (IEEE Std 80, 2000:91)

$$E_t = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_f}{L_m} \quad (2-25)$$

dengan :

- E_t : Tegangan sentuh
- ρ : Rata – rata nilai resistivitas tanah
- K_i : Faktor ketidakmerataan kerapatan arus
- K_m : faktor geometrik tegangan mesh
- I_f : Arus gangguan ke tanah.
- L_M : Panjang total penanaman konduktor efektif

Faktor geometrik K_m dapat dituliskan pada persamaan (2-26).

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D_{maks}^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_{maks} + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_{maks} \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right) \right] \quad (2-26)$$

dengan :

- D : Jarak antar konduktor paralel (m), pada sistem pengetanahan dengan jarak antar konduktor tidak seragam, untuk penentuan K_m diambil jarak antar konduktor yang terbesar.
- h : Kedalaman penanaman konduktor (m)
- d : Diameter konduktor pengetanahan (m)
- n : Jumlah konduktor paralel (m)

Untuk sistem *grid* dengan pengetanahan *rod*, atau sistem *grid* dengan beberapa pengetanahan *rod*.

$$K_{ii} = 1 \text{ dengan pembumian } rod = 1$$

Untuk sistem *grid* tanpa pengetanahan *rod* dituliskan pada persamaan (2-27).

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{\frac{2}{n}}} \quad (2-27)$$

Untuk acuan *grid* dapat dituliskan pada persamaan (2-28) dibawah ini

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (2-28)$$

$h_0 = 1$ m (referensi kedalaman kisi-kisi)

Menurut Thapar, Gerez, Balakrishnan 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 yang dapat diwakili dengan jumlah konduktor paralel yang setara dari *grid* persegi panjang. Jumlah konduktor paralel (n) dapat dinyatakan dengan Persamaan (2-29) sebagai berikut: (IEEE st 80, 2000:93)

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (2-29)$$

dengan :

$$n_a = \frac{2 \times L_c}{L_p} \quad (2-30)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}} \quad ; n_b = 1 \text{ untuk grid persegi} \quad (2-31)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{0.7 \times A} \quad ; n_c = 1 \text{ untuk grid persegi dan persegi panjang} \quad (2-32)$$

$$n_d = \frac{D_{maks}}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad ; n_d = 1 \text{ untuk grid persegi dan persegi panjang} \quad (2-33)$$

dengan :

L_c : Panjang total konduktor *grid* (m)

L_p : Panjang konduktor keliling *grid* (m)

A : Luas area sistem pengetanahan (m^2)

L_x : Panjang maksimum *grid* sumbu x (m)

L_y : Panjang maksimum *grid* sumbu y (m)

D_{maks} : Jarak maksimum antara 2 *grid* satuan (m)

Faktor ketidakmerataan kerapatan arus dapat dihitung dengan hubungannya dengan jumlah konduktor paralel utama (n) dengan Persamaan (2-34) sebagai berikut: (IEEE Std 80, 2000:94)

$$K_i = 0.644 + 0.148 n \quad (2-34)$$

Untuk *grid* dengan grounding *rod* dipojok atau diseluruh percabangan konduktor *grid*, panjang total penanaman konduktor efektif (L_m) dapat dinyatakan dengan Persamaan (2-35) sebagai berikut: (IEEE st 80, 2000:94)

$$L_m = L_c + \left[1.55 + 1.22 \times \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \times L_R \quad (2-35)$$

dengan :

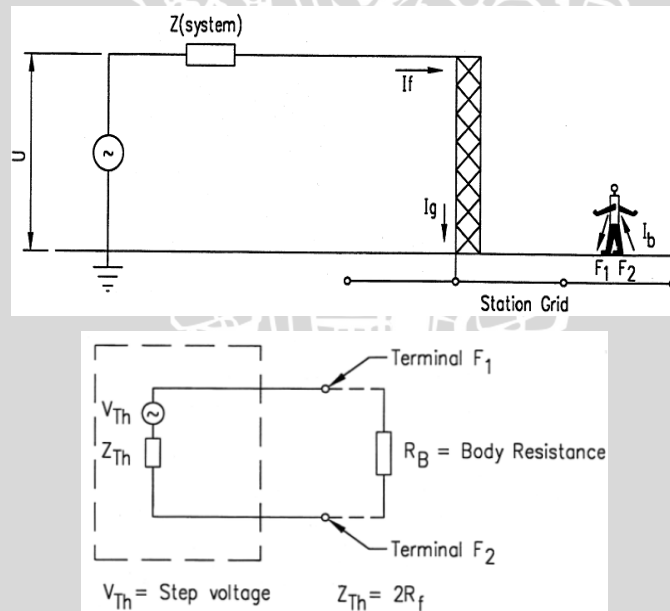
L_r : Panjang masing-masing konduktor *rod* (m)

L_R : Panjang total konduktor *rod* (m)

L_c : Panjang total konduktor *grid* (m)

2.8.3 Tegangan Langkah

Tegangan langkah adalah tegangan yang timbul di antara dua kaki orang yang sedang berdiri diatas tanah yang sedang dialiri oleh arus tembus ke tanah, dapat dilihat Gambar 2.13.



Gambar 2.13. (a) Tegangan langkah dan (b) rangkaian penggantinya

Sumber : IEEE std 80, 2000 : 19

Manusia dengan berat badan 50 dan 70 Kg dapat dihitung tegangan langkah pada Persamaan (2-36) dan (2-37) dibawah ini. (IEEE std 80-2000:34)

$$E_{s70} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \quad (2-36)$$

$$E_{s50} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \quad (2-37)$$

dengan :

E_{s50} : Tegangan langkah untuk berat badan manusia 50 kg,

E_{s70} : Tegangan langkah untuk berat badan manusia 70 kg.

t_f : Durasi/lama gangguan (waktu pemutusan), (s)

C_s : Faktor reduksi nilai resistivitas permukaan tanah

ρ_s : Tahanan jenis permukaan material (lapisan batu koral), (Ohm-m)

Tabel 2.5. Tegangan Langkah yang Diiijinkan dan Lama Gangguan Dengan Berat 50 kg dan Ketebalan Batu Koral 10 cm

Lama Gangguan (t, detik)	Tegangan Langkah yang Diiijinkan (volt)
0.1	7,000
0.2	4,950
0.3	4,040
0.4	3,500
0.5	3,140
1.0	2,216
2.0	1,560
3.0	1,280

Sumber : Hutaaruk 1987 : 133.

2.8.4 Tegangan Langkah Sebenarnya

Tegangan langkah terbesar sebenarnya dapat dihitung dengan Persamaan (2-38). (IEEE std 80, 2000:94)

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_f}{L_s} \quad (2-38)$$

dengan :

- E_s : Tegangan langkah
- ρ : Rata – rata nilai resistivitas tanah
- K_i : Faktor ketidakmerataan kerapatan arus
- K_s : faktor geometrik
- I_f : Arus gangguan ke tanah.
- L_s : Panjang total penanaman konduktor efektif

Menurut Sverak tegangan langkah maksimum diperkirakan terjadi lebih dari jarak 1 m, dimulai dan diperluas dari konduktor terluar pada sudut yang membagi dua sudut paling ekstrim dari *grid*. Untuk kedalaman biasa dari 0,25 m < h < 2,5 m faktor geometri, K_s adalah : (IEEE st 80, 2000:94)

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} [1 - 0.5^{n-2}] \right] \quad (2-39)$$

dengan :

- K_s : Faktor Geometrik Tegangan Langkah
- D : Jarak antar konduktor paralel (m), pada sistem pengetanahan dengan jarak antar konduktor tidak seragam, untuk K_s diambil jarak antar konduktor yang terkecil.
- n : Jumlah konduktor paralel dalam kisi-kisi utama (m)
- h : Kedalaman *grid* (m)

Untuk pengetanahan *grid* menggunakan atau tidak menggunakan *rod*, total panjang efektif konduktor yang ditanamkan L_s adalah : (IEEE st 80, 2000:94)

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R \quad (2-40)$$

dengan :

- L_R : Panjang total konduktor *rod* (m)
- L_C : Panjang total konduktor *grid* (m)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian dalam penyusunan skripsi ini adalah metode perhitungan dimana data-data yang didapatkan akan dihitung dan kemudian di analisis, adapun metode ini meliputi :

3.1 Studi Literatur

Skripsi ini dibuat dengan memanfaatkan beberapa literatur baik dari buku referensi maupun dari hasil penelitian sebelumnya. Studi literature ini mempelajari tentang :

- a. Teori dasar mengenai tahanan jenis tanah
- b. Bahaya - bahaya yang terjadi pada gardu induk pada keadaan gangguan ke tanah.
- c. Teori dasar mengenai arus gangguan ke tanah
- d. Teori dasar sistem pengetanahan peralatan Gardu Induk

3.2 Pengambilan Data

Data yang digunakan adalah data sekunder yang berkaitan dengan sistem pengetanahan peralatan yang akan dirancang di Gardu Induk PLTU IPP KALTIM 3 (2X100MW). Adapun data sekunder yang digunakan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut :

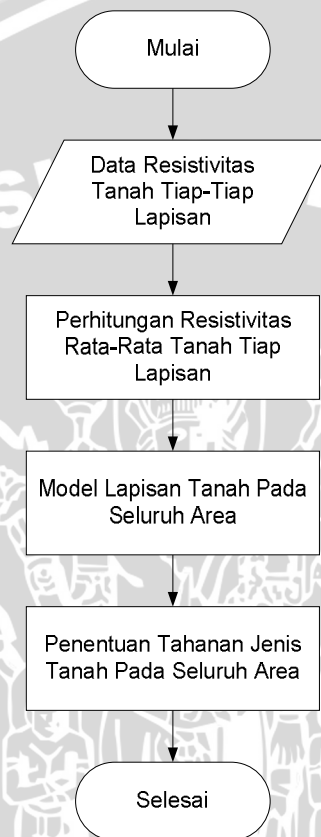
- a. Data Tahanan Jenis Tanah
- b. Data Spesifikasi Generator dan Transformator
- c. Layout Pembangkit dan Substation

3.3 Analisis

Setelah data terkumpul, maka dianalisis sesuai dengan rumus pada teori-teori dan literatur. Selanjutnya data-data tersebut akan digunakan sebagai bahan analisis yang mengacu pada rumusan masalah, meliputi hal-hal sebagai berikut:

3.3.1 Analisis Tahanan Jenis Tanah

Analisis tahanan jenis tanah dilakukan untuk mendapatkan nilai tahanan jenis tanah yang sesuai berdasarkan kedalaman penanaman konduktor. Langkah-langkah analisis tahanan jenis tanah diperlihatkan dengan diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir analisis tahanan jenis tanah

Sumber : Peneliti

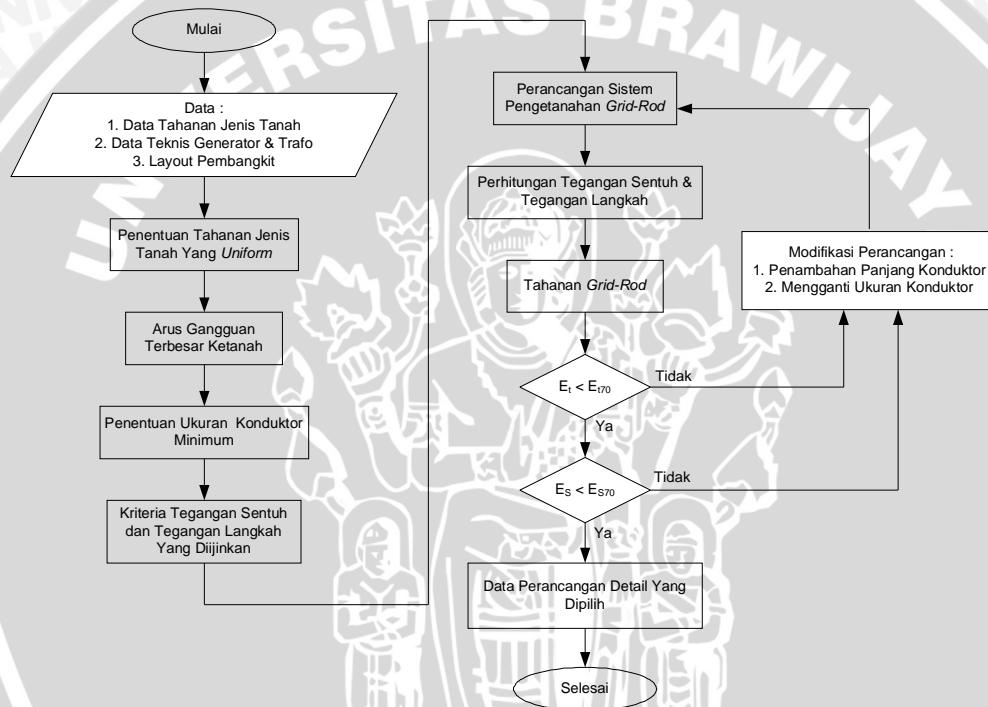
Setelah data dari pengukuran tahanan jenis tanah didapat, langkah pertama yaitu mendata nilai tahanan jenis tanah minimum sampai maksimum, menghitung nilai tahanan jenis rata-rata tiap lapisan tanah, menentukan model lapisan tanah di area gardu induk dan menentukan tahanan jenis tanah untuk dasar perhitungan dalam perancangan sistem pengetanahan peralatan serta dapat disimpulkan kedalaman yang efektif untuk penanaman konduktor.

3.3.2 Analisis Arus Gangguan Ketanah

Data arus gangguan terbesar ke tanah akan digunakan sebagai data masukan untuk perhitungan tegangan sentuh dan tegangan langkah pada sistem pengetanahan peralatan area Gardu Induk pada PLTU IPP KALTIM 3.

3.3.3 Analisis Perancangan Pengetanahan Peralatan di Gardu Induk

Langkah – Langkah dalam perancangan sistem pengetanahan diperlihatkan pada diagram alir pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Blok diagram perancangan

Sumber : Peneliti

3.4 Penutup

Pada bagian penutup ini akan dilakukan pengambilan kesimpulan dari hasil analisis perhitungan, sehingga dapat diketahui perancangan sistem pengetanahan peralatan yang aman bagi makhluk hidup serta dapat digunakan sebagai saran bagi pengembangan penelitian kedepan.

BAB IV

ANALISIS DAN PERANCANGAN

4.1 Gambaran Lokasi PLTU

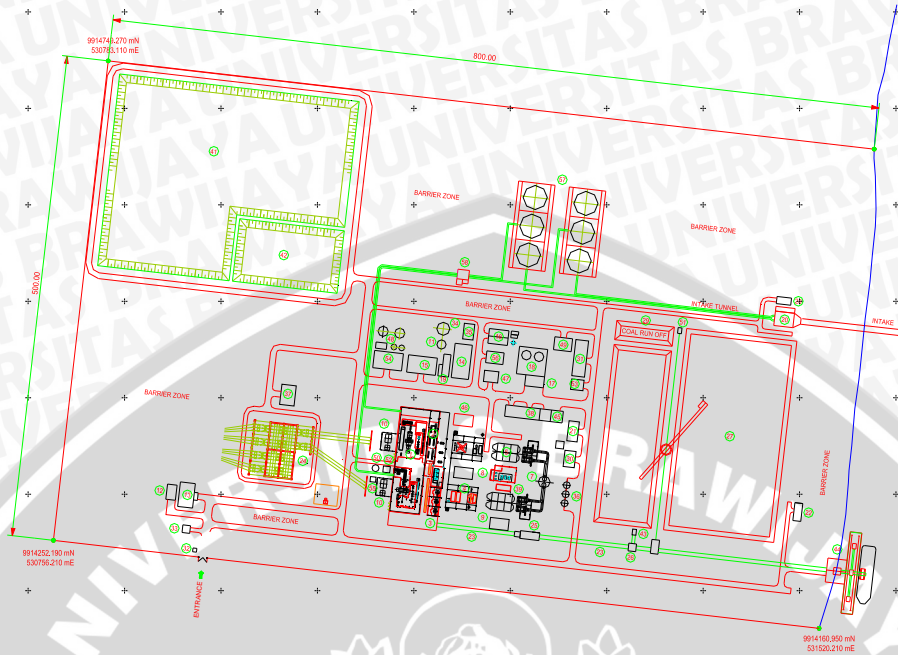
Lokasi pekerjaan Studi Penyelidikan Lapangan (*Site Investigation*) untuk PLTU IPP KALTIM 3 (2X100 MW) adalah di Desa Tamapole Kecamatan Muara Jawa, Kabupaten Kutai Kartanegara, Propinsi Kalimantan Timur. Koordinat geografis berada pada 0°46'26.1"S ; 117°17'02.5"E.



Gambar 4.1 Peta Lokasi PLTU IPP KALTIM 3

Sumber : *Site Investigation* PLTU IPP KALTIM 3 (2X100MW)

Pada lokasi tersebut akan dibangun Pembangkit baru yaitu PLTU IPP KALTIM 3 dengan kapasitas 2x100 MW. Area Pembangkit tersebut di bagi menjadi beberapa area yaitu steam turbin bulding, area Transformatorr, area 150 kV Substation, area Boiler, area Ash Disposal dan lain-lain. Area Gardu Induk terdiri dari *Switchyard* dan gedung gardu induk. (Layout PLTU IPP KALTIM 3 secara jelas dapat dilihat pada Lampiran 1)



Gambar 4.2 Layout PLTU IPP KALTIM 3

Sumber : *Site Investigation* PLTU IPP KALTIM 3 (2X100MW)

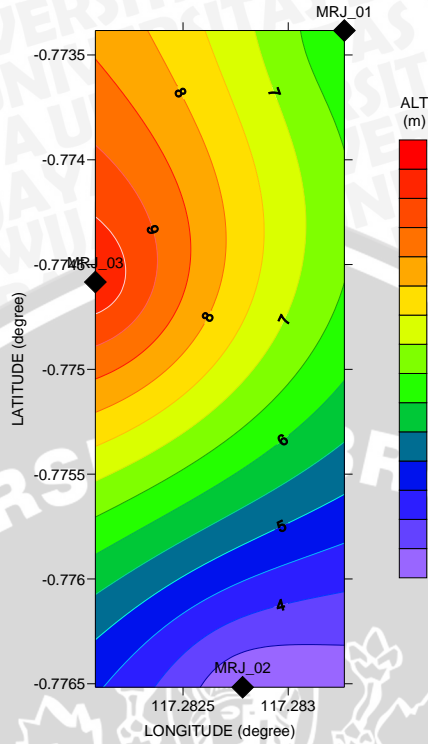
4.2 Analisis Tahanan Jenis Tanah

Pengukuran tahanan jenis tanah pada luas daerah yang akan dirancang untuk sistem pengetanahan dilakukan dengan menggunakan metode geolistrik konfigurasi Wenner-Schlumberger/Schlumberger termodifikasi. Pengukuran ini juga dilakukan di area yang dilingkupi sistem pengetanahan peralatan. Pengukuran tersebut dilakukan oleh tim survei topografi dan penyelidikan lapangan PLTU IPP KALTIM 3 yang bekerja sama dengan Universitas Brawijaya. Pengukuran dilakukan pada 3 titik yang berbeda yaitu pada Tabel 4.1 sebagai berikut :

Tabel 4.1. Lokasi pengukuran geolistrik

NO	TITIK	LINTANG	INT N(DEG)	BUJUR	BUJ(DEG)	ALT(m)	LOKASI
1	MRJ_01	0;46.403	-0.77338	117;16.996	117.28327	6	PLTU Muara Jawa
2	MRJ_02	0;46.591	-0.77652	117;16.967	117.28278	3	PLTU Muara Jawa
3	MRJ_03	0;46.475	-0.77458	117;16.925	117.28208	10	PLTU Muara Jawa

Sumber : *Site Investigation* PLTU IPP KALTIM 3 (2X100MW)



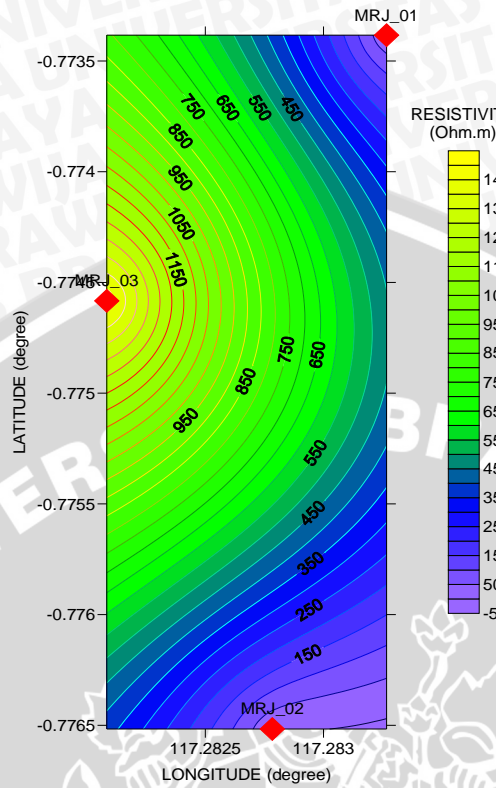
Gambar 4.3 Topografi dan distribusi titik-titik ukur.
 Sumber : *Site Investigation* PLTU IPP KALTIM 3 (2X100MW)

4.2.1 Nilai Rata-Rata Tahanan Jenis Tiap Lapisan Tanah

Dengan menggunakan metode geolistrik telah didapat data hasil pengukuran resistivitas lapisan tanah di lokasi dari kedalaman 2 m hingga kedalaman 60 m. Sebagai contoh perhitungan mencari nilai rata-rata tahanan jenis tanah untuk kurva iso-resistivity pada kedalaman 2 meter yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. terdapat 11 lapisan tahanan jenis tanah yang berbeda pada kurva iso-resistivitynya yaitu dengan merata-ratakan nilai dari setiap lapisan.

$$\begin{aligned}
 \text{Rata - Rata} &= \frac{(150+250+350+450+550+650+750+850+950+1050+1150)}{11} \Omega.m \\
 &= 650 \Omega.m
 \end{aligned}$$

Sehingga nilai rata-rata tahanan jenis pada kedalaman 2 meter adalah 650 Ω-m. Untuk kurva iso-resistivity pada kedalaman yang lain dapat dilihat pada lampiran 2 dan untuk nilai rata-rata dari tahanan jenis pada setiap kedalaman di tunjukkan pada Tabel 4.2.



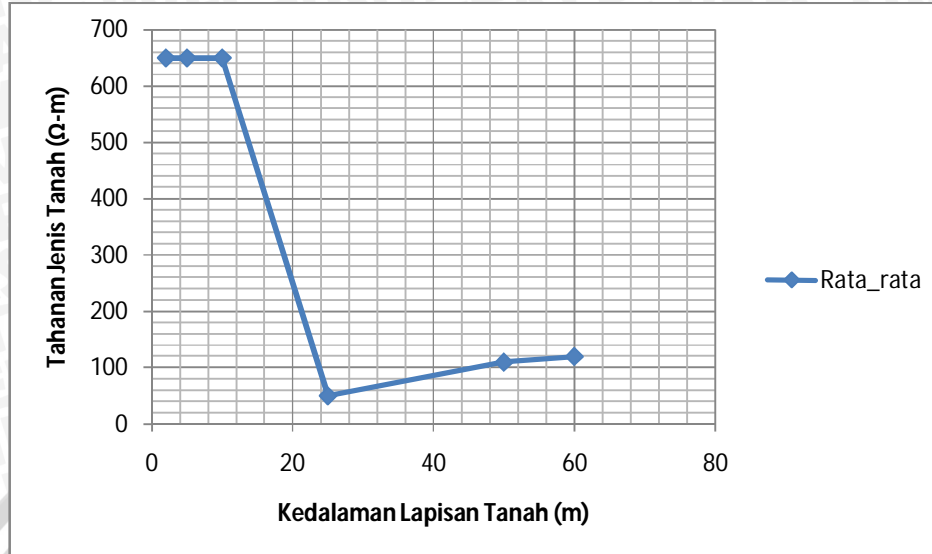
Gambar 4.4 Kurva-kurva *isoresistivity* dari hasil pengukuran geolistrik pada kedalaman 2 meter

Sumber : Site Investigation PLTU IPP KALTIM 3 (2X100MW)

Tabel 4.2. Tahanan jenis/*resistivitas* lapisan tanah pada kedalaman tertentu.

No	Kedalaman (m)	Resistivitas Rata-Rata (Ω -m)
1	2	650
2	5	650
3	10	650
4	25	50
5	50	110
6	60	120

Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 4.5 Grafik rata-rata tahanan jenis tanah berdasarkan perhitungan pada kedalaman tertentu.

Sumber : Hasil Perhitungan

Grafik tahanan jenis pada Gambar 4.5 menggambarkan ada beberapa lapisan yang menunjukkan nilai tahanan jenis yang sama, yaitu pada kedalaman 2 meter sampai 10 meter dengan tahanan jenis rata-rata sebesar 650 Ω -m, tetapi nilai tahanan jenis turun sangat tajam sebesar 50 Ω -m pada kedalaman 25 meter dan mengalami kenaikan yang landai sampai pada lapisan tanah dengan kedalaman 60 meter.

Sebagai dasar perhitungan perancangan sistem pengetanahan menggunakan tahanan jenis 650 Ω -m. Disamping itu untuk kemudahan penanaman elektroda batang/rod cukup diambil kedalaman antara 10 m – 15 m. Yang terpenting sistem pengetanahan yang dirancang mampu membatasi tegangan sentuh dan tegangan langkah yang tidak melebihi tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan. Persyaratan ini dapat dipenuhi dengan cara menambah panjang konduktor pentanahan yang di tanam baik konduktor untuk mesh maupun konduktor untuk batang pentanahan (*rod*).

4.3 Penentuan Perancangan Sistem Pengetanahan Peralatan di area Gardu Induk

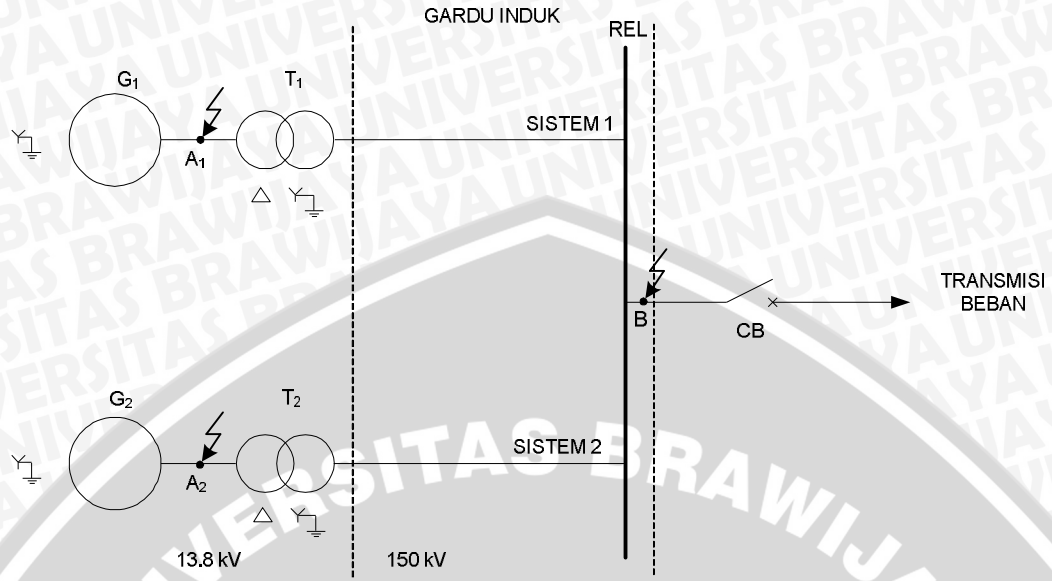
PLTU IPP KALTIM 3 (2 x 100 MW) berencana akan beroperasi dan terinterkoneksi melalui transmisi 150 kV. Lokasi pembangkit tersebut berada di desa/kelurahan Tamapole Kecamatan Muara Jawa Kabupaten Kutai Kartanegara. Pada Pembangunan PLTU baru ini harus di ikuti dengan pembangunan Gardu Induk, sehingga perlu dibuat sistem pengetanahan peralatan guna memperkecil tegangan permukaan tanah yang dapat terjadi dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan ketanah.

Langkah – langkah perhitungan untuk menentukan perancangan pengetanahan peralatan yang sesuai yaitu sebagai berikut :

4.3.1 Penentuan Arus Gangguan Maksimum

Perhitungan arus gangguan dilakukan dengan mengasumsikan tidak ada sistem Pembangkit lain yang terkoneksi dengan Pembangkit baru. Jadi perhitungan dalam menentukan arus gangguan maksimum dengan mengasumsikan Generator dan Transformator yang baru menyuplai beban melalui Switchyard 150 KV dan terdapat rele dan CB dengan waktu yang cepat pada Switchyard 150 KV untuk memutuskan beban saat terjadinya gangguan.

Penentuan arus gangguan maksimum ditentukan dengan mencari arus gangguan ketanah terbesar pada titik A_1 , A_2 dan B seperti ditunjukkan pada diagram garis tunggal pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Diagram Garis Tunggal Unit Pembangkit Baru

Sumber : Peneliti

Adapun data yang diperlukan dalam analisis aliran daya sebagai perhitungan arus hubung singkat dalam perancangan sistem pentanahan peralatan adalah data kemampuan generator dan kemampuan transformator sebagai berikut pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 :

Tabel 4.3. Data Generator

Deskripsi Generator	Nilai
Rating Daya	130 MVA
Rating Tegangan	13,8 kV
Phasa	3 Phasa
Frekuensi	50 Hz
Reaktansi Transient ($X'd$)	0.218 p.u
Reaktansi Sub transient ($X''d$)	0.132 p.u

Sumber : Data Perencanaan Pembangkit Baru, PLN

Tabel 4.4. Data Transformator

Deskripsi Transformator	Nilai
Rating Daya	130 MVA
Rating Tegangan HV/LV	150/13.8 kV
Rating Arus HV/LV	477/5439 A
Phasa/Frekuensi	3 Phasa/50 Hz
Vektor Group	D,yN 11
Cooling	ONAN/ONAF
Impedansi Hubungsingkat	12.5 %

Sumber : Data Perencanaan Transformator Baru, PLN

Langkah pertama penentuan nilai impedansi dengan bentuk p.u. yang ada ke dalam p.u. atau besaran dasar yang baru. Dengan menggunakan besaran dasar, yaitu daya dasar dan tegangan dasar. Dengan adanya besaran dasar ini, semua nilai perhitungan dilakukan dalam per satuan atau per unit (p.u.) untuk memudahkan perhitungan. Daya dasar yang digunakan ($S_{\text{dasar baru}}$) adalah 100 MVA, sedangkan tegangan dasarnya ($V_{\text{dasar baru}}$) adalah 150 kV.

Sebagai contoh untuk nilai impedansi baru pada generator 1 dapat di hitung dengan menggunakan Persamaan (2-1) sebagai berikut :

$$Z_{\text{baru}}(p.u) = Z_{\text{lama}}(p.u) \times \left(\frac{V_{\text{dasar lama}}(kV)}{V_{\text{dasar baru}}(kV)} \right)^2 \times \left(\frac{S_{\text{dasar baru}}(MVA)}{S_{\text{dasar lama}}(MVA)} \right)$$

$$X_{G11} \text{ baru} = 0.132 \times \left(\frac{150}{150} \right)^2 \left(\frac{100}{130} \right) = 0.1015 \text{ p.u}$$

$$X_{G12} \text{ baru} = 0.132 \times \left(\frac{150}{150} \right)^2 \left(\frac{100}{130} \right) = 0.1015 \text{ p.u}$$

Sehingga

$$Z_1 = R + jX_{G11} = 0 + j0.1015 = j0.1015 \text{ p.u}$$

$$Z_2 = Z_1 = j0.1015 \text{ p.u}$$

X_0 berubah menurut jarak (pitch) gulungan jangkar sehingga suatu nilai rata-rata sulit ditentukan. Variasinya adalah dari 0.1 hingga 0.7 dari $X''d$ (Stevenson 1984:466). Sehingga diasumsikan 0.4 dari $X''d$.

$$X_{G10} \text{ baru} = 0.0528 \times \left(\frac{150}{150}\right)^2 \left(\frac{100}{130}\right) = 0.0406 \text{ p.u}$$

Sehingga

$$Z_0 = R + jX_{G10} = 0 + j0.0406 = j0.0406 \text{ p.u}$$

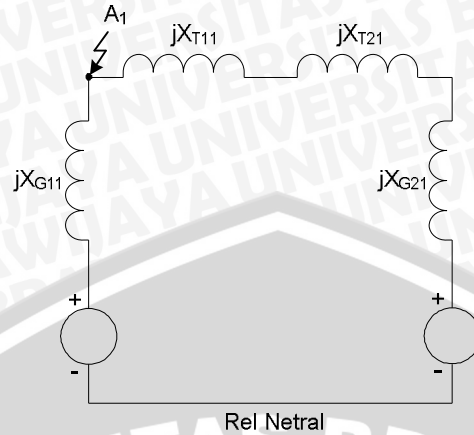
Nilai impedansi urutan setiap komponen pada Di Gardu Induk PLTU IPP KALTIM 3 selengkapnya ditunjukkan dalam Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Nilai Impedansi Urutan Tiap Komponen

No	Komponen Sistem	Nilai Impedansi		
		Z_1	Z_2	Z_0
1	Generator 1	$j0.1015$	$j0.1015$	$j0.0406$
2	Transformator 1	$j0.0962$	$j0.0962$	$j0.0962$
3	Generator 2	$j0.1015$	$j0.1015$	$j0.0406$
4	Transformator 2	$j0.0962$	$j0.0962$	$j0.0962$

Sumber : Hasil Perhitungan

Setelah impedansi urutan setiap komponen sistem diketahui, maka langkah selanjutnya adalah menentukan nilai impedansi rangkaian ekuivalen urutan dari setiap titik gangguan dimana gangguan terjadi. Sebagai contoh kasus, ketika gangguan terjadi di titik A_1 pada diagram garis tunggal yang ditunjukkan Gambar 4.6 dapat diubah menjadi rangkaian ekuivalen urutan positif pada Gambar 4.7.



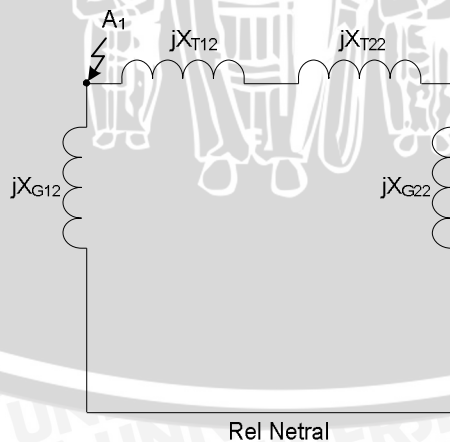
Gambar 4.7 Rangkaian ekuivalen urutan positif pada gangguan di titik A₁

Sumber : Stevenson, 1984:281

Sehingga nilai impedansi urutan positif saat gangguan dititik A₁ pada rangkaian sederhana di atas adalah :

$$Z_1 = \frac{(jX_{G11})(jX_{T11}+jX_{T21}+jX_{G21})}{(jX_{G11}+jX_{T11}+jX_{T21}+jX_{G21})} = \frac{(j0.1015)(j0.0962+j0.0962+j0.1015)}{(j0.1015+j0.0962+j0.0962+j0.1015)} = j0.07544 \text{ p.u}$$

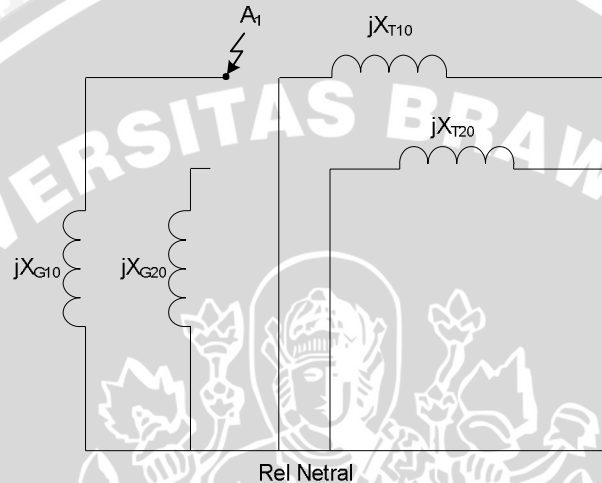
Karena rangkaian sederhana urutan negatif identik sama dengan rangkaian urutan positif yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, sehingga nilai impedansi ekuivalen urutan negatif saat gangguan di titik A₁ adalah $Z_{2A} = jX_{2G} = j0,0611 \text{ p.u}$



Gambar 4.8 Rangkaian ekuivalen urutan negatif pada gangguan di titik A₁

Sumber : Stevenson, 1984:281

Pada rangkaian ekivalen urutan nol, arus urutan nol hanya akan mengalir jika membentuk rangkaian lengkap. Sehingga rangkaian ekivalen urutan nol tergantung pada sistem tersebut ditanahkan atau tidak dan juga tergantung terhadap hubungan Transformatornya. Dengan mengacu pada Tabel 2.1 rangkaian ekivalen urutan nol diperlihatkan pada Gambar 4.9, sehingga nilai impedansi ekivalen urutan nol saat gangguan dititik A_1 adalah $Z_0 = j0.0406$ pu



Gambar 4.9 Rangkaian ekivalen urutan nol pada gangguan di titik A_1

Sumber : Stevenson, 1984:281

Untuk gangguan di titik A_2 dan B, proses menentukan nilai impedansi ekivalen urutan positif, negatif, dan nol hampir sama dengan gangguan di titik A_1 . Sehingga nilai impedansi urutan untuk gangguan dititik A_1 , A_2 dan B ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Nilai Impedansi urutan ekivalen untuk titik gangguan A dan B

No.	Titik Gangguan	Nilai Impedansi (p.u)	
1.	Titik A ₁	Impedansi ekivalen urutan positif (Z ₁)	0.07544 p.u
		Impedansi ekivalen urutan negatif (Z ₂)	0.07544 p.u
		Impedansi ekivalen urutan nol (Z ₀)	0.0406 p.u
2.	Titik A ₂	Impedansi ekivalen urutan positif (Z ₁)	0.07544 p.u
		Impedansi ekivalen urutan negatif (Z ₂)	0.07544 p.u
		Impedansi ekivalen urutan nol (Z ₀)	0.0406 p.u
3.	Titik B	Impedansi ekivalen urutan positif (Z ₁)	0.0989 p.u
		Impedansi ekivalen urutan negatif (Z ₂)	0.0989 p.u
		Impedansi ekivalen urutan nol (Z ₀)	0.0481 p.u

Sumber : Hasil Perhitungan

Hasil impedansi urutan dari rangkaian ekivalen diatas dimasukkan ke dalam persamaan arus gangguan ke tanah yaitu sebagai contoh kasus, gangguan satu fasa ke tanah yang sesuai dengan Persamaan (2-3) dan (2-4).

$$I_f = I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1 + j0.0}{j0.07544 + j0.07544 + j0.0406} = -j5.2225 \text{ p.u}$$

$$I_a = 3 \times I_{a1} = 3 \times (-j5.2225) = -j15.6675 \text{ p.u}$$

Dengan arus dasar sesuai Persamaan (2-2) :

$$I_{dasar}(A) = \frac{S_{dasar}(kVA)}{\sqrt{3} V_{dasar}(kV)}$$

$$I_{dasar} = \frac{100000}{\sqrt{3}(150)} = 384.9 \text{ A}$$

Sehingga arus gangguan satu fasa ke tanah saat gangguan terjadi di titik A₁ adalah:

$$I_f(A) = I_f(\text{p.u.}) \times I_{dasar}(A)$$

$$I_f(A) = (-j15.6675) \times 384.9 = 6030.42 \text{ A}$$

Dengan demikian nilai arus gangguan ke tanah, yaitu arus gangguan satu fasa ke tanah ($1\phi - G$), arus gangguan dua fasa ke tanah ($2\phi - G$) dan arus gangguan tiga fasa (3ϕ) di setiap titik gangguan di Gardu Induk PLTU IPP KALTIM 3 ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan arus gangguan disetiap titik gangguan.

TITIK GANGGUAN	ARUS GANGGUAN (A)		
	$1\phi - G$	$2\phi - G$	3ϕ
A ₁	6040.42	7371.72	5102.08
A ₂	6040.42	7371.72	5102.08
B	4695.82	5918.50	3891.81

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.7 diatas, arus gangguan maksimum yang terjadi adalah arus gangguan dua fasa ke tanah pada titik A₁ dan A₂. Sehingga arus gangguan maksimum yang dipakai untuk menentukan perancangan sistem pengetanahan untuk area Gardu Induk adalah sebesar 7371.72 Ampere.

4.3.2 Ukuran dan Jenis Konduktor Pengetanahan

Jenis konduktor yang akan digunakan untuk perancangan sistem pengetanahan peralatan untuk gardu induk adalah konduktor tembaga berlilit tipe *hard-drawn*. Konduktor tembaga tipe ini dibuat dengan cara diperkeras dengan jalan ditarik.

Berdasarkan Tabel 2.2 mengenai berbagai jenis material, konduktor tipe *hard-drawn* memiliki konduktivitas sebesar 97 %, koefisien panas tahanan jenis (α_r) sebesar 0.00381 pada 1/°C, koefisien panas tahanan jenis sebesar (Ko) 242 °C, suhu terbesar konduktor tembaga yang diijinkan (T_m) sebesar 1084 °C, tahanan jenis konduktor (ρ_r) sebesar 1.78 $\mu\Omega$ -cm, dan kapasitas panas per unit volume ($TCAP$) sebesar 3.42 J/(cm³.°C).

Untuk menentukan ukuran konduktor pengetanahan minimum diperlukan temperatur lingkungan terbesar (T_a) yaitu dengan suhu 30 °C. Dengan waktu pemutusan arus gangguan (t_f) sebesar 1 detik dan arus gangguan (I_f) sebesar

7371.72 A dengan luas penampang minimum konduktor dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2-16) yaitu sebagai berikut.

$$A = I_f \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_f \times a_r \times p_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}}$$

$$= 7371.72 \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3.42 \times 10^{-4}}{1 \times 0.00381 \times 1.78}\right) \ln\left(\frac{242 + 1084}{242 + 30}\right)}} = 26.384 \text{ mm}^2$$

Untuk memudahkan perancangan pengetanahan, maka ukuran konduktor disesuaikan dengan yang ada dipasaran. Mengacu pada produk yang dikeluarkan oleh perusahaan Phelps dodge (Spesifikasi produk secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 4), sehingga luas penampang konduktor adalah (A_k) 35 mm² dan ukuran diameter konduktor (d) sebesar 7.56 mm.

4.3.3 Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh yang Diijinkan.

Tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan sangat bergantung pada waktu gangguan (t_f) dan ketebalan lapisan batu koral (h_s). Semakin lama pemilihan waktu pemutusan gangguan maka tegangan sentuh dan langkah yang diijinkan semakin rendah. Demi meningkatkan faktor keamanan dan keselamatan waktu pemutusan tenaga diambil yang tertinggi diantara standar yang diterapkan oleh Hutaeruk dan IEEE yaitu sebesar 1 detik..

Ketebalan batu koral mempengaruhi nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan. IEEE merekomendasikan ketebalan lapisan batu koral antara 0.08 sampai 0.15 meter. Dengan mengacu kedalaman penanaman pengetanahan *grid* sedalam 1 meter, maka faktor reduksi dari nilai resistivitas tanah, tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan untuk masing-masing ketebalan batu koral ditunjukkan pada Tabel 4.8 dengan menggunakan Persamaan (2-22), (2-23), (2-24), serta Persamaan (2-36) dan (2-37) yaitu sebagai berikut :

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right)}{2h_s + 0.09}$$

$$= 1 - \frac{0.09 \left(1 - \left(\frac{650}{3000}\right)\right)}{2 \times 0.08 + 0.09} = 0.7180$$

$$E_{t50} = (1000 + 1.5Cs \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 1.5 \times 0.7180 \times 3000) \frac{0.116}{\sqrt{1}} = 490.8 \text{ volt}$$

$$E_{t70} = (1000 + 1.5Cs \times \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 1.5 \times 0.7180 \times 3000) \frac{0.157}{\sqrt{1}} = 664.3 \text{ volt}$$

$$E_{s50} = (1000 + 6Cs \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 6 \times 0.7180 \times 3000) \frac{0.116}{\sqrt{1}} = 1615.2 \text{ volt}$$

$$E_{s70} = (1000 + 6Cs \times \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$= (1000 + 6 \times 0.7180 \times 3000) \frac{0.157}{\sqrt{1}} = 2186.1 \text{ volt}$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, untuk ketebalan masing-masing koral dapat di lihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Tegangan sentuh dan langkah yang diijinkan pada seseorang dengan berat 50 dan 70 kg untuk masing-masing ketebalan batu koral.

No.	Ketebalan batu koral (hs)	Faktor reduksi (Cs)	E _{t50} (volt)	E _{t70} (volt)	E _{s50} (volt)	E _{s70} (volt)
1.	0.08 meter	0.7180	490.8	664.3	1615.2	2186.1
2.	0.09 meter	0.7389	501.7	679.0	1658.8	2245.1
3.	0.10 meter	0.7569	511.1	691.7	1696.4	2296.0
4.	0.11 meter	0.7726	519.3	702.8	1729.1	2340.3
5.	0.12 meter	0.7864	526.5	712.6	1757.9	2379.3
6.	0.13 meter	0.7986	532.9	721.2	1783.4	2413.8
7.	0.14 meter	0.8095	538.5	728.9	1806.2	2444.5
8.	0.15 meter	0.8192	543.6	735.8	1826.6	2472.1

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari hasil Tabel 4.8 menunjukkan semakin besar ketebalan batu koral, batas nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg dan 70 kg juga semakin meningkat. Sehingga semakin besar ketebalan batu koral yang digunakan maka perancangan sistem pengetanahan peralatan akan semakin baik. Tetapi juga perlu dipertimbangkan aspek ekonominya. Karena tegangan langkah dan tegangan sentuh yang diijinkan untuk orang dengan berat badan 50 kg lebih rendah dibandingkan orang dengan berat badan 70 kg, maka batas tegangan yang digunakan dalam perhitungan dipilih batas terbesar yaitu 735.8 volt untuk tegangan sentuh (E_{t70}) dan 2472.1 volt untuk tegangan langkah (E_{s70}).

4.4 Analisis Perancangan Sistem Pengetanahan Peralatan Untuk Gardu Induk Baru

Dari data-data yang didapat akan digunakan untuk menentukan perancangan sistem pengetanahan peralatan untuk gardu induk baru. Langkah-langkah dalam penentuan perancangan sistem pengetanahan peralatan untuk Gardu induk baru yang sesuai yaitu sebagai berikut.

4.4.1 Tegangan Sentuh Maksimum (E_t)

Berdasarkan IEEE bahwa jarak antar konduktor untuk membentuk beberapa buah mesh/*grid* adalah 2 meter atau lebih. Dikarenakan distribusi tegangan tergantung pada jarak elektroda paralel, makin besar jarak elektroda maka pendistribusian tegangannya makin tidak rata dan makin dekat jarak elektroda paralel maka pendistribusian tegangannya semakin merata. Sehingga dengan mempertimbangkan kebutuhan konduktor yang akan digunakan maka pada perancangan ini digunakan jarak antar mesh / *grid* adalah D_{max} 5 m dan D_{min} 4 m untuk memperkecil kebutuhan konduktor. Sistem pengetanahan yang terdapat pada Gardu Induk di PLTU IPP KALTIM 3 memiliki bentuk persegi panjang. Nilai n_a , n_b , n_c dan n_d dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-30) sampai Persamaan (2-33) yaitu sebagai berikut.

$$D_{max} = 5 \text{ m}$$

$$D_{min} = 4 \text{ m}$$

Dengan :

$$L_T = (17 \times 76) + (20 \times 80) + (340 \times 12) = 6972 \text{ meter}$$

$$L_c = (17 \times 76) + (20 \times 80) = 2892 \text{ meter}$$

$$L_p = (L_x + L_y) \times 2 = (76 + 80) \times 2 = 312 \text{ meter}$$

$$n_a = \frac{2 \times L_c}{L_p} = \frac{2 \times 2892}{312} = 18.54$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}} \sqrt{\frac{312}{4 \times \sqrt{6080}}} = 1$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \times A}{L_x \times L_y}} = \left[\frac{76 \times 80}{6080} \right]^{\frac{0.7 \times 6080}{76 \times 80}} = 1$$

$$n_d = \frac{D_{maks}}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} = \frac{5}{\sqrt{76^2 + 80^2}} = 0.05 \quad ; \text{ karena berbentuk persegi } (n_d) = 1$$

Jadi jumlah konduktor paralel efektif (n) dapat dihitung dengan Persamaan (2-29) yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} n &= n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \\ &= 18.54 \times 1 \times 1 \times 1 \\ &= 18.54 \end{aligned}$$

Faktor geometri (K_m) dihitung dengan Persamaan (2-26) dan (2-28) yaitu sebagai berikut :

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.414$$

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D_{maks}^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_{maks} + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_{maks} \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \\ &= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{5^2}{16 \times 1 \times 0.00756} + \frac{(5+2 \times 1)^2}{8 \times 5 \times 0.00756} - \frac{1}{4 \times 0.00756} \right) + \frac{1}{1.414} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \times 18.54 - 1)} \right) \right] \\ &= 0.66 \end{aligned}$$

Faktor ketidakmerataan kerapatan arus (K_i) dapat dihitung dengan Persamaan (2-34) yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} K_i &= 0.644 + 0.148 \cdot n \\ &= 0.644 + 0.148 \times 18.54 = 3.388 \end{aligned}$$

Tegangan sentuh (E_t) yang terjadi dapat dihitung dengan Persamaan (2-25) yaitu sebagai berikut :

$$E_t = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_F}{L_C + \left(1.55 + 1.22 \left[\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right] \right) L_R}$$

$$= \frac{650 \times 0.66 \times 3.388 \times 7371.72}{2892 + \left(1.55 + 1.22 \left[\frac{14.5}{\sqrt{76^2 + 80^2}} \right] \right) 4080} = 1154.91 \text{ volt}$$

Jadi tegangan sentuh maksimum (E_t) yang terjadi adalah 1154.91 volt lebih besar dari tegangan sentuh yang diijinkan (E_{t70}) yaitu sebesar 735.8 volt.

4.4.2 Tegangan Langkah Maksimum (E_s)

Faktor geometri K_s dapat dihitung dengan Persamaan (2-39) yaitu sebagai berikut:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D_{min} + h} + \frac{1}{D_{min}} [1 - 0.5^{n-2}] \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 1} + \frac{1}{4 + 1} + \frac{1}{4} [1 - 0.5^{18.54-2}] \right] = 0.3025$$

Penanaman konduktor efektif (L_s) dapat dihitung dengan Persamaan (2-40) yaitu sebagai berikut :

$$L_s = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R$$

$$= 0.75 \times 2892 + 0.85 \times 4080 = 5673$$

Tegangan langkah (E_s) yang terjadi dapat dihitung dengan Persamaan (2-38) yaitu sebagai berikut :

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_F}{0.75 L_C + 0.85 L_R}$$

$$= \frac{650 \times 0.3025 \times 3.388 \times 7371.72}{0.75 \times 2892 + 0.85 \times 4080} = 871.34 \text{ volt}$$

Jadi tegangan langkah maksimum (E_s) yang terjadi adalah 871.34 volt lebih kecil dari tegangan langkah yang diijinkan (E_{s70}) yaitu sebesar 2472.1 volt.

4.4.3 Tahanan pengetanahan (R_g)

Nilai tahanan sistem pengetanahan gabungan / *Grid-Rod* (R_g) dapat ditentukan dengan cara menentukan terlebih dahulu tahanan pengetanahan *Grid* (R_1) tahanan pengetanahan Rod (R_2) dan tahanan pengetanahan bersama (R_m) yaitu dengan menggunakan Persamaan (2-18) sampai dengan Persamaan (2-21) sebagai berikut :

Tahanan pengetanahan *grid* (R_1) dengan menggunakan persamaan (2-18).

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{K_1 \times L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \\ &= \frac{650}{3.14 \times 2892} \left[\ln \left(\frac{2 \times 2892}{\sqrt{0.00756 \times 2 \times 1}} \right) + \frac{1.385 \times 2892}{\sqrt{6080}} - 5.65 \right] = 4.0426 \Omega \end{aligned}$$

Tahanan pengetanahan *rod* (R_2) dengan menggunakan persamaan (2-19).

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[\ln \left(\frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 \times L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \\ &= \frac{650}{2 \times 3.14 \times 340 \times 4080} \left[\ln \left(\frac{4 \times 4080}{16 \times 10^{-3}} \right) - 1 + \frac{2 \times 1.385 \times 12}{\sqrt{6080}} (\sqrt{340} - 1)^2 \right] \\ &= 0.0106 \Omega \end{aligned}$$

Tahanan pengetanahan bersama (R_m) dengan menggunakan persamaan (2-20).

$$\begin{aligned} R_m &= \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{K_1 \times L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \\ &= \frac{650}{3.14 \times 2892} \left[\ln \left(\frac{2 \times 2892}{12} \right) + \frac{1.385 \times 2892}{\sqrt{6080}} - 5.65 + 1 \right] = 3.7863 \Omega \end{aligned}$$

Sehingga tahanan sistem pengetanahan gabungan / *Grid-Rod* dapat diselesaikan dengan Persamaan (2-21).

$$\begin{aligned} R_g &= \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \\ &= \frac{4.0426 \times 0.0106 - 3.7863^2}{4.0426 + 0.0106 - 2 \times 3.7863} = 4.061 \Omega \end{aligned}$$

Untuk layout perancangan *grid-rod* 1 dapat dilihat pada Gambar 4.10 serta data pada perancangan tersebut.

Data Perancangan *Grid-Rod* 1:

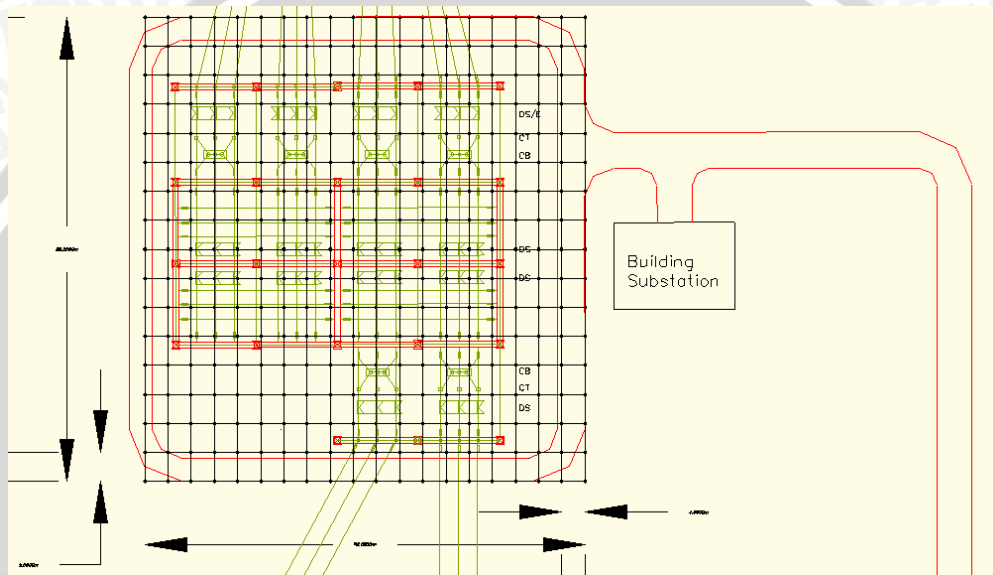
Dmaks : 5 meter

Dmin : 4 meter

Lx : 76 meter

Ly : 80 meter

Panjang rod : 12 meter

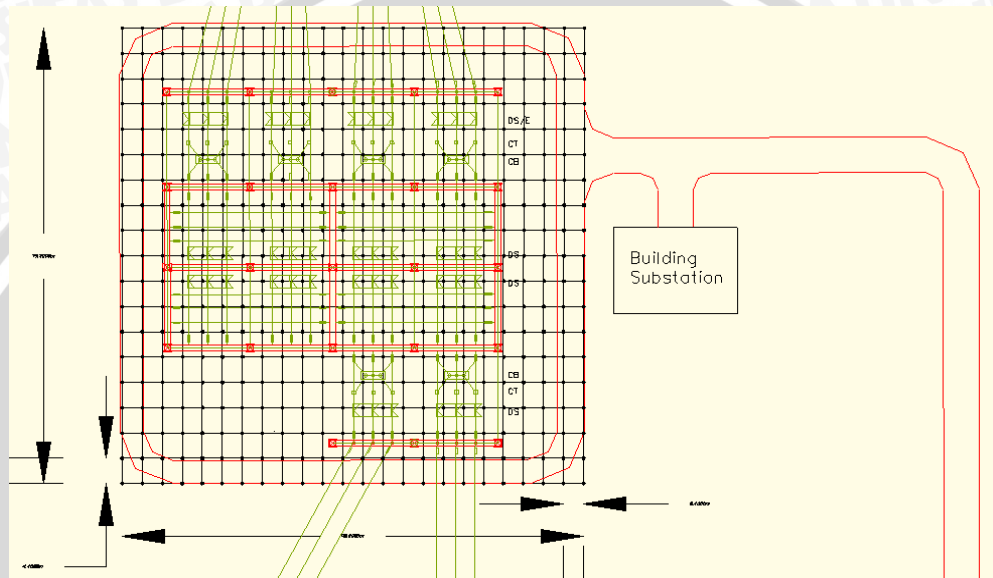
Gambar 4.10 Perancangan *Grid-Rod* 1 (Awal)

Sumber : Peneliti

Dari hasil perhitungan didapat nilai tegangan sentuh maksimum (E_t) melebihi nilai tegangan sentuh yang diijinkan (E_{t70}) tetapi untuk tegangan langkah maksimum (E_{s70}) dan nilai tahanan pengetanahan (R_g) dari perancangan sudah memenuhi syarat.

Perancangan awal dari sistem pengetanahan peralatan untuk area Gardu Induk tidak memenuhi persyaratan. Sehingga perbaikan perancangan perlu dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan sentuh maksimum yang diijinkan. Perbaikan perancangan dilakukan dengan menambahkan konduktor arah sumbu x dan konduktor arah sumbu y ataupun dengan menambah panjang konduktor batang/rod sampai mendapatkan perancangan sistem pengetanahan peralatan dengan nilai tegangan sentuh yang diijinkan.

Proses perbaikan perancangan ditunjukkan pada Gambar 4.11 (Gambar lebih jelas dapat dilihat pada Lampiran 5) dan data setiap perancangan ditunjukkan pada Tabel 4.9. Sedangkan perhitungan tegangan langkah maksimum, tegangan sentuh maksimum dan tahanan pengetanahan pada setiap perancangan termasuk Perancangan *Grid-Rod 1* yang telah dihitung diatas ditunjukkan pada Tabel 4.10.



Gambar 4.11 Perancangan *Grid-Rod 2*

Sumber : Peneliti

Untuk data pada perancangan *Grid-Rod 2* adalah sebagai berikut :

Data Perancangan *Grid-Rod 2*:

- Dmaks : 4.4 meter
- Dmin : 3.4 meter
- Lx : 78.2 meter
- Ly : 79.2 meter
- Panjang rod : 12 meter

Tabel 4.9 Data Perancangan Setiap Proses Perbaikan

No	Perbaikan Perancangan	Jenis Data	Nilai Komponen (meter)
1	Perancangan <i>Grid-Rod 1</i>	Panjang Konduktor Keseluruhan (L_T)	6972.0
		Panjang Total Konduktor <i>Grid</i> (L_C)	2892.0
		Panjang Total Konduktor <i>Rod</i> (L_R)	4080.0
		Jarak Antar Konduktor Terbesar (D_{max})	5.0
		Jarak Antar Konduktor Terbesar (D_{min})	4.0
2	Perancangan <i>Grid-Rod 2</i>	Panjang Konduktor Keseluruhan (L_T)	8858.6
		Panjang Total Konduktor <i>Grid</i> (L_C)	3386.6
		Panjang Total Konduktor <i>Rod</i> (L_R)	5472.0
		Jarak Antar Konduktor Terbesar (D_{max})	4.4
		Jarak Antar Konduktor Terbesar (D_{min})	3.4

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4.10 Perhitungan Tegangan Langkah, Tegangan Sentuh dan Tahanan Pengetanahan Setiap Perbaikan Perancangan

No	Jenis Perancangan	Tegangan Sentuh (volt)	Tegangan Langkah (volt)	Tahanan Pengetanahan (ohm)
1	Perancangan <i>Grid-Rod 1</i>	1154.91	871.34	4.061
2	Perancangan <i>Grid-Rod 2</i>	950.74	829.78	3.970

Sumber : Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.10 untuk nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah terkecil terdapat pada Perancangan *Grid-Rod 2* yaitu sebesar 950.74 volt untuk tegangan sentuh dan 829.78 volt untuk tegangan langkah. Tetapi dengan membandingkan hasil perhitungan pada Tabel 4.8 maka nilai untuk Perancangan *Grid-Rod 2* tidak memenuhi persyaratan walaupun menggunakan ketebalan batu koral 0.15 meter.

Untuk mendapatkan tegangan sentuh dan tegangan langkah yang kecil yaitu dengan mengganti ukuran konduktor yang lebih besar dari ukuran sebelumnya dengan dasar data perancangan *Grid-Rod* yang sama, maka dalam proses perancangan yang telah dilakukan didapatkan ukuran konduktor sebesar 240 mm^2 . Untuk nilai tegangan sentuh maksimum, tegangan langkah maksimum dan tahanan pengetanahan dapat ditunjukkan pada Tabel 4.11.

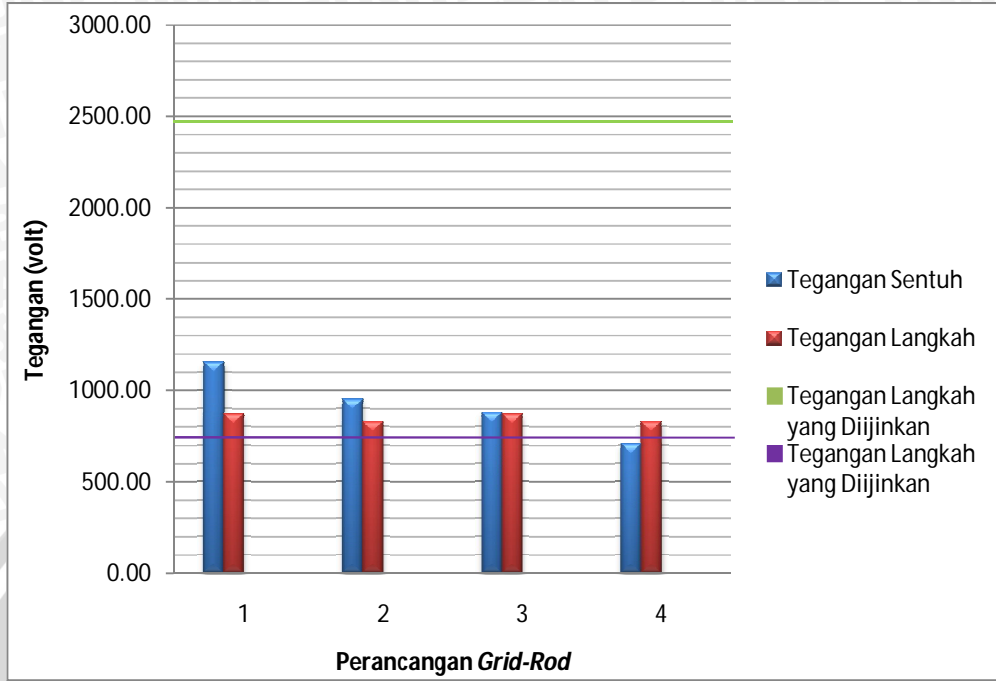
Tabel 4.11 Perhitungan Tegangan Langkah, Tegangan Sentuh dan Tahanan Pengetanahan Dengan Mengganti Ukuran Konduktor

No	Jenis Perancangan	Tegangan Sentuh (volt)	Tegangan Langkah (volt)	Tahanan Pengetanahan (ohm)
Ukuran Konduktor 240 mm^2				
1	Perancangan <i>Grid-Rod</i> 3	878.81	871.34	4.021
2	Perancangan <i>Grid-Rod</i> 4	708.50	829.78	3.936

Sumber : Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.11 Perancangan *Grid-Rod* 4 sudah memenuhi persyaratan untuk keselamatan manusia berdasarkan Tabel 4.8 yaitu untuk tegangan sentuh (E_{t70}) yang diijinkan sebesar 735.8 volt dan untuk tegangan langkah (E_{s70}) yang diijinkan sebesar 2472.1 volt dengan ketebalan batu koral 0.15 meter. Maka dalam perancangan *Grid-Rod* 4 cukup menggunakan ketebalan batu koral sebesar 0.12 meter dengan tegangan sentuh (E_{t70}) sebesar 712.6 volt dan tegangan langkah (E_{s70}) sebesar 2379.3 volt.

Untuk mengetahui perbandingan tegangan sentuh terbesar dan tegangan langkah terbesar sebelum dan sesudah penggantian ukuran konduktor dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Grafik Tegangan Setiap Perbaikan Perancangan

Sumber : Hasil Perhitungan



Tabel 4.12 Data lengkap hasil perancangan sistem pengetanahan peralatan untuk Gardu Induk baru (Perancangan *Grid-Rod* 4)

No.	Data Desain	Keterangan
1.	Luas daerah yang dilingkupi sistem pengetanahan (A)	6193.4 m ²
2.	Total panjang konduktor horisontal/ <i>grid</i> (L _C)	3386.6 m
3.	Total panjang konduktor vertikal/ <i>rod</i> (L _R)	5472.0 m
4.	Jarak paralel antar konduktor terbesar (D _{maks})	4.4 m
5.	Jarak paralel antar konduktor terkecil (D _{min})	3.4 m
6.	Panjang grid terbesar sumbu x (L _x)	78.2 m
7.	Panjang grid terbesar sumbu y (L _y)	79.2 m
8.	Tahanan jenis permukaan material / lapisan batu koral (ρ _s)	3000 Ω-m
9.	Ketebalan permukaan material (h _s)	0.12 m
10.	Kedalaman penanaman konduktor <i>grid</i> (h)	1 m
11.	Kedalaman penanaman konduktor <i>rod</i> (h)	12 m
12.	Jenis Konduktor pengetanahan	Tembaga berlilit <i>hard-drawn</i>
13.	Diameter konduktor <i>grid</i> (d)	20.25 mm
14.	Diameter konduktor <i>rod</i> (d)	16 mm

Sumber : Hasil Perhitungan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

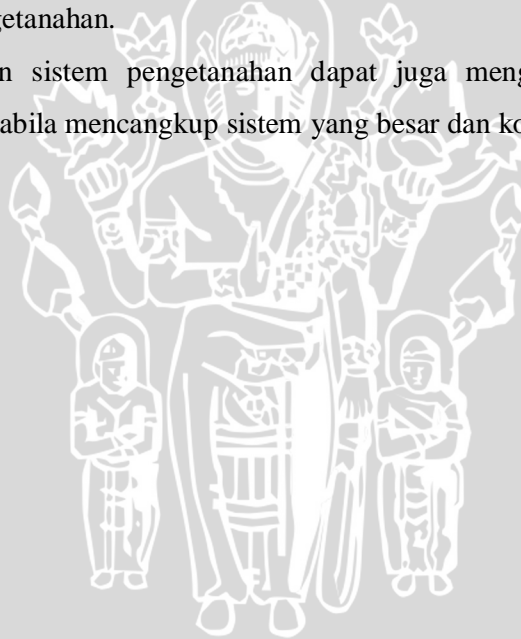
Dari hasil perhitungan dan analisis terhadap perancangan sistem pengetanahan peralatan Gardu Induk untuk unit pembangkit baru di PLTU IPP KALTIM 3 dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Berdasarkan analisis tahanan jenis tanah menggunakan model lapisan tanah seragam didapatkan nilai tahanan jenis rata-rata sebesar 650 ohm-meter sehingga dalam perancangan digunakan elektroda batang/rod berdiameter 16 mm dengan kedalaman batang konduktor 12 meter. Nilai tahanan pengetanahan dari perancangan sistem pengetanahan sebesar 3.936 ohm. Nilai tersebut sudah memenuhi persyaratan dengan tahanan pengetanahan maksimum yang direkomendasikan oleh IEEE yaitu sebesar < 5 ohm.
2. Berdasarkan hasil analisis arus gangguan ketanah yaitu pada 1 fasa ketanah sebesar 6040.42 ampere, 2 fasa ketanah sebesar 7371.72 ampere dan 3 fasa ketanah sebesar 5102.08 ampere, maka yang digunakan sebagai dasar perancangan sistem pengetanahan adalah sebesar 7371.72 ampere. Konduktor *grid* menggunakan jenis konduktor tembaga berlilit tipe *hard-drawn* dengan luas penampang 240 mm².
3. Dengan panjang total konduktor *grid* (L_C) sepanjang 3386.6 meter dan panjang total konduktor *rod* (L_R) sepanjang 5472.0 meter didapat tegangan sentuh dan tegangan langkah maksimum dari hasil analisis perancangan sistem pengetanahan peralatan adalah sebesar 708.50 volt untuk tegangan sentuh yang nilai tersebut memenuhi persyaratan dengan nilai di bawah tegangan sentuh yang diijinkan yaitu sebesar 712.6 volt dan 829.78 volt untuk tegangan langkah yang nilai tersebut memenuhi persyaratan dengan nilai di bawah tegangan langkah yang diijinkan yaitu sebesar 2379.3 volt dengan ketebalan batu koral 0.12 meter.

5.2 Saran

Dari hasil perhitungan dan analisis terhadap perancangan sistem pengetanahan peralatan Gardu Induk di PLTU IPP KALTIM 3 yang telah dilakukan ada beberapa saran untuk perancangan sistem pengetanahan yang baik untuk kedepannya yaitu

1. Perlu penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan nilai tahanan pentanahan yang lebih kecil dengan penambahan zat aditif berupa garam, air, bentonit dan lain-lain.
2. Arus gangguan ketanah terbesar dapat menggunakan bantuan software apabila mencangkup sistem yang besar dan kompleks. Diperlukan penelitian lebih lanjut terhadap penentuan Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah yang terjadi disetiap titik pada area yang dilingkupi sistem pengetanahan.
3. Perancangan sistem pengetanahan dapat juga menggunakan bantuan software apabila mencangkup sistem yang besar dan kompleks.



DAFTAR PUSTAKA

- Agung. 2014. *Perencanaan Sistem Pengetanahan Peralatan untuk Unit Pembangkit Baru di PT. Indonesia Power Grati*. Skripsi. Malang : Universitas Brawijaya.
- Anderson, Paul M. 1995. *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE Inc., New York.
- Arta, Dana. 2000. *Pengaruh Penambahan Daya Dari PLTG Gilimanuk Terhadap Sistem Pengetanahan Peralatan Gardu Induk Gilimanuk*. Skripsi. Malang : Universitas Brawijaya.
- Galuh. 2013. *Analisis Pengaruh Penambahan Unit Pembangkit Baru Terhadap Arus Gangguan ke Tanah pada Gardu Induk Grati*. Skripsi. Malang : Universitas Brawijaya.
- Hutauruk, T.S. 1999. *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Jakarta: Erlangga.
- IEEE Std. 80.2000. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. USA
- IEEE Std. 142. 2007. *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book)*. USA.
- IEEE 665-1995. *IEEE Guide For Generating Station Grounding*. USA
- Stevenson, William D., Jr. 1993. Terjemahan : Ir. Kamal Idris. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Edisi Keempat, Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Sulasno. 1993. *Analisa Sistem Tenaga Listrik*. Satya Wacana, Semarang.
- Text For Intensive Lecture On Substation. 1989. *East Java Transmission Line and Substation Project*. Osaka Japan
- Weedy, B.M. 1988. *Sistem Tenaga Listrik*. Penerbit Aksara Persada Indonesia

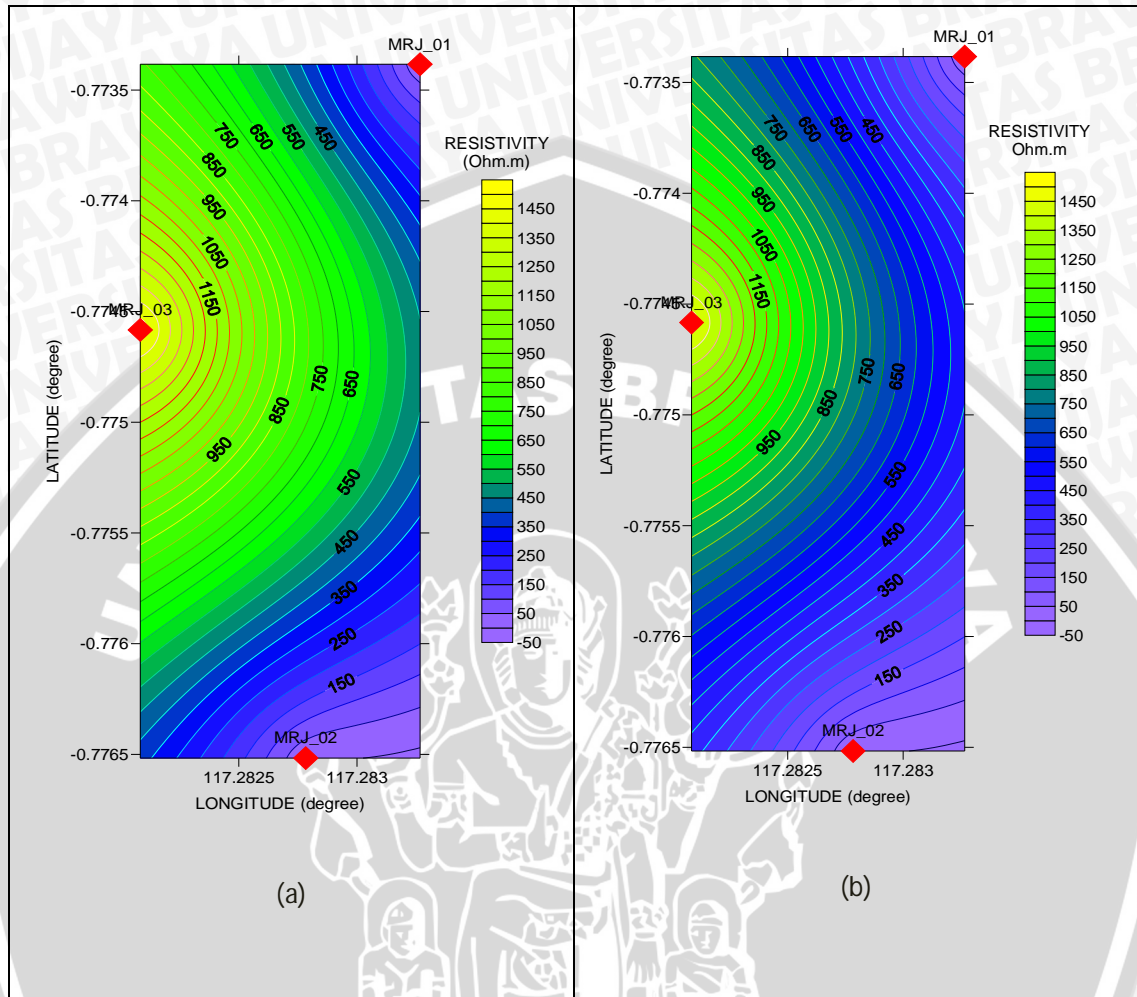
LAYOUT PLTU IPP
(*INDEPENDENT POWER
PRODUCER*) KALTIM3



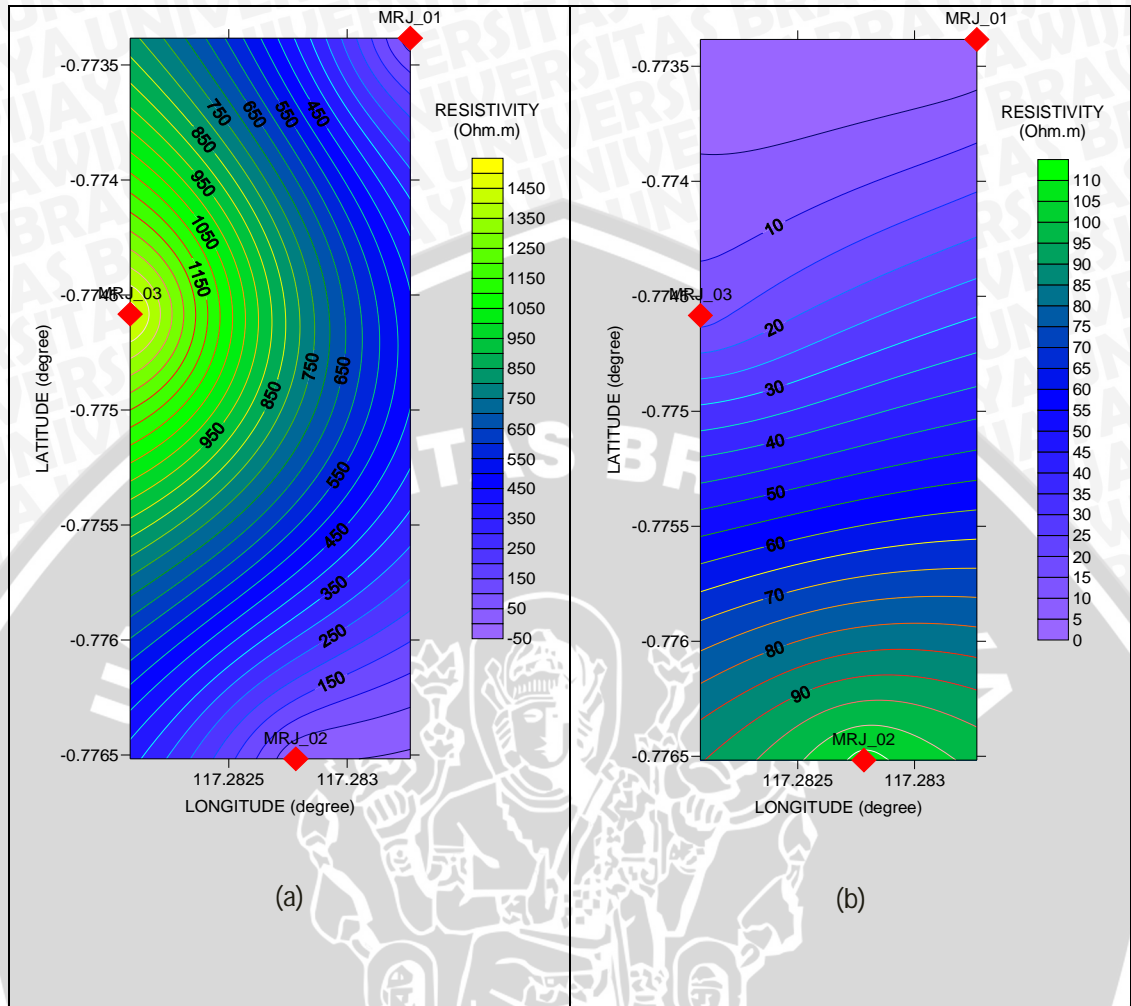


**TAHANAN JENIS TANAH
HASIL PENGUKURAN
GEOLISTRIK**

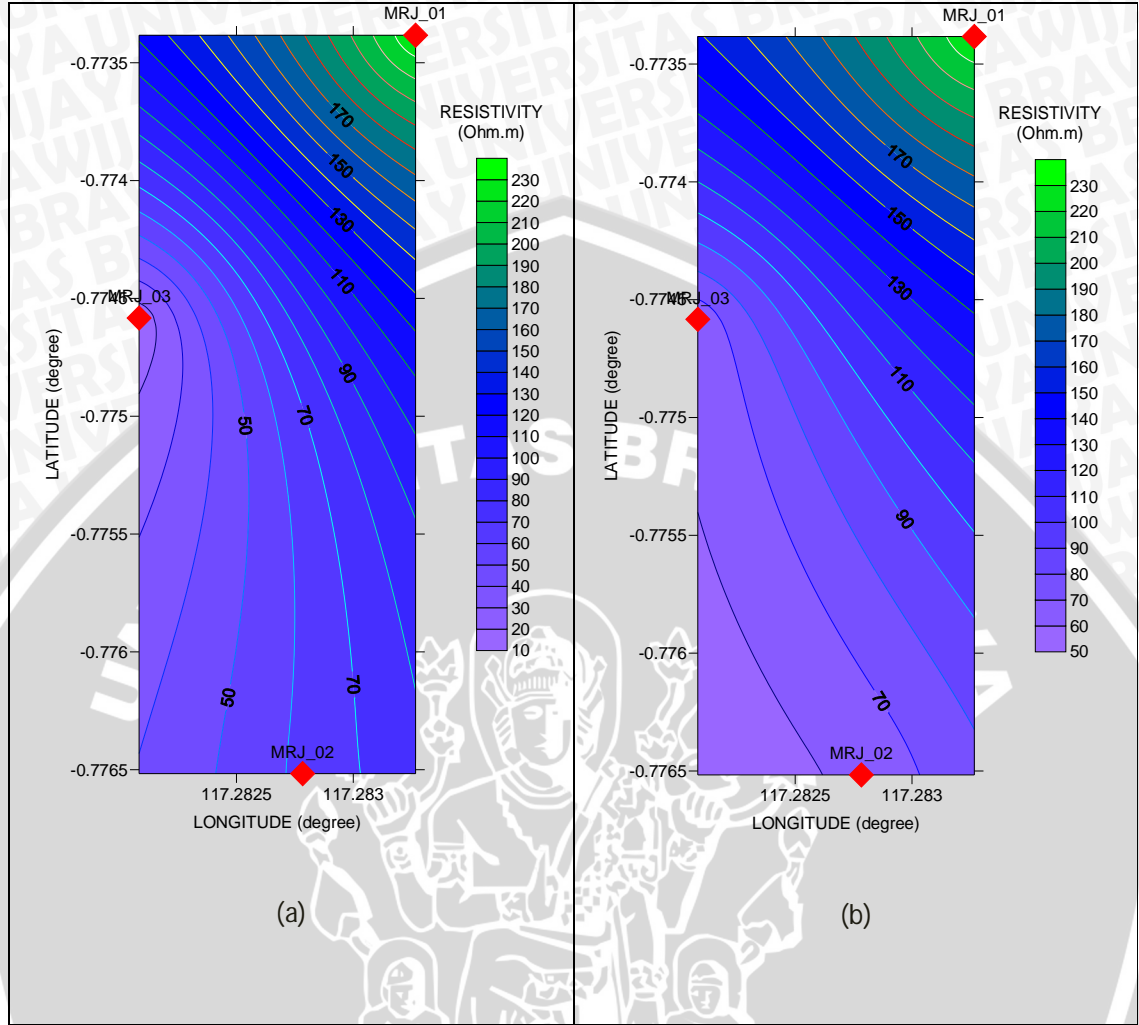




Gambar 1. Contour lamina pada kedalaman (a) 2 meter (b) 5 meter



Gambar 2. Contour lamina pada kedalaman (a) 10 meter (b) 25 meter



Gambar 3. Contour lamina pada kedalaman (a) 50 meter (b) 60 meter

DATA TEKNIS GENERATOR DAN TRANSFORMATOR



PLTU Kaltim-Teluk Balikpapan (2 × 110MW)

GENERATOR SPECIFICATION

CONTRACTOR: ADHI-SINO CONSORTIUM

MANUFACTURER: SHANDONG JINAN POWER EQUIPMENT

FACTORY CO.,LTD

型号	WX21Z-066LLT
Type:	WX21Z-066LLT
额定容量	130MVA
Rated capacity:	130MVA
额定功率	110MW
Rated power:	110MW
最大连续出力	120MW
MCR:	120MW
最大出力	125MW
MR:	125MW
额定功率因数	0.85 (滞相)
Rated power factor:	0.85 (lagging)
额定电压	13.8kV
Rated voltage:	13.8kV
额定转速	3000r/min
Rated speed:	3000r/min
频率	50Hz
Frequency:	50Hz
相数	3
Phase:	3
极数	2
Poles:	2
定子线圈接法	YY
Stator coil connection:	YY
转速	3000r/min
Rotate speed:	3000r/min
效率 (保证值)	≥98.62%
Efficiency(guarantee)	≥98.62%
短路比 (保证值)	0.5
Short-circuit ratio(guarantee):	0.5

绝缘等级	F 级 (按 B 级温升考核)
Insulation grade:	F grade(Check according to B grade temperature rise)
瞬变电抗 X_d'	0.218 (非饱和值)
Transient reactance X_d'	0.218(Unsaturated value)
次瞬变电抗 X_d''	0.132 (饱和值)
Subtransient Reactance X_d''	0.132 (saturation value)
承担负序能力:	
Undertake negative sequence ability:	
稳态 I_2 (标么值)	8%
Steady state I_2 (per-unit value) :	8%
暂态 I_2^2T	10s
Transient state I_2^2T :	10s
冷却方式	空冷
Cooling type:	Air cooling

2.2.2 励磁系统基本参数:

Basic parameter of excitation system

204.3V (静态励磁)

204.3V(static excitation)

1321A (静态励磁)

1321A(static excitation)

强励顶值电压 2.0 倍

Ceiling voltage at the forcing: $\times 2.0$

强励时间 20Sec

Time at the forcing: 20Sec

2.3 设备型式及性能

2.3 Type and performance of equipment

2.3.1 发电机在额定频率、额定电压、额定功率因数、额定冷却介质条件下，机端连续额定输出功率为 110MW。

2.3.1 Generator terminal continuous rated output power when Generator is under the condition of rated power,rated voltage,rated power factor and rated cooling medium

PLTU Kaltim-Teluk Balikpapan (2 × 110MW)

**GENERATOR TRANSFORMER
SPECIFICATION**

CONTRACTOR: ADHI-SINO CONSORTIUM

MANUFACTURER: TIANWEI BAOBIAN TRANSFORMER CO.LTD

(1) 系统额定电压:	150kV (高压侧) /13.8kV (低压侧)
System Rated Voltage:	150kV (H.V. Side) /13.8kV (L.V. Side)
(2) 系统最高电压:	170kV (高压侧) /15kV (低压侧)
System Highest Voltage:	170kV (H.V. Side) /15kV (L.V. Side)
(3) 系统额定频率:	50Hz:
System Rated frequency:	50Hz:
(4) 系统中性点接地方式:	150kV: 直接接地
System Neutral grounding mode:	150kV: Direct Ground

2 技术条件

2 Technical Conditions

2.1 规程、规范和标准

2.1 Applied Standard and Specification

试验符合以下标准和协议的要求，标准和协议中不包括的试验项目依据企业标准进行。

Tests shall basically comply with the specified Standards or particular specification. However, if test items are not required in the standards or specifications, they will comply with manufacturer's standard practices of transformer or parts.

标准如下:

The standards are as follow:

GB1094 电力变压器

GB1094 Power transformers

eqv

IEC60076 电力变压器

IEC60076 Power transformers

2.2 设备主要参数:

2.2 Equipmentthe of Technical Parameters:

2.2.1 型式: 降压变、三相式、自然油循环风冷、铜绕组无载调压、低损耗、户外、凝热型; 变压器应耐盐雾。

2.2.1 Type: Step-down transformer, Three-phase type, ONAN/ONAF, Copper windings no load

voltage. Low loss. outside; Transformer should be Anti-salt spray.	
2.2.2 冷却方式:	自然油循环风冷 (ONAN/ONAF);
2.2.2 Cooling mode:	Natural oil circulating air cooled (ONAN/ONAF);
2.2.3 额定频率:	50Hz;
2.2.3 Rated frequency:	50Hz;
2.2.4 额定容量:	130MVA (绕组平均温升 65K 时);
2.2.4 Rated capacity:	130MVA
2.2.5 系统最高工作电压:	高压侧: 170kV 低压侧: 15kV
2.2.5 System Highest Voltage:	H.V.Side: 170kV L.V. Side: 15kV
2.2.6 额定电流:	高压侧: 477A 低压侧: 5439A
2.2.6 Rated Current:	H.V. Side: 477A L.V. Side: 5439A
2.2.7 绕组额定电压:	高压侧: 157.5±8×1.25%kV 低压侧: 13.8kV
2.2.7 Winding Rated Voltage:	H.V. Side: 157.5±8×1.25%kV L.V. Side: 13.8kV
2.2.8 短路阻抗:	12.5% 允许偏差: ±7.5%
2.2.8 short-circuit impedance:	12.5% Allowable deviation: ±7.5%
2.2.9 变压器组联接组标号:	YN,d11;
2.2.9 Transformer Connection group label :	YN,d11;
2.2.10 端子连接方式:	高压侧: 架空铝导线; 低压侧: 离相封闭母线; 高压侧中性点: 架空铝导线.
2.2.9 Terminal Connections:	H.V. side: Isolated Phase Bus duct L.V. side: Non Segregated Phase Bus Duct L.V. side neutral point: Overhead Aluminum Wire



**KATALOG UKURAN
KABEL DI PASARAN**





Bare Copper Conductor

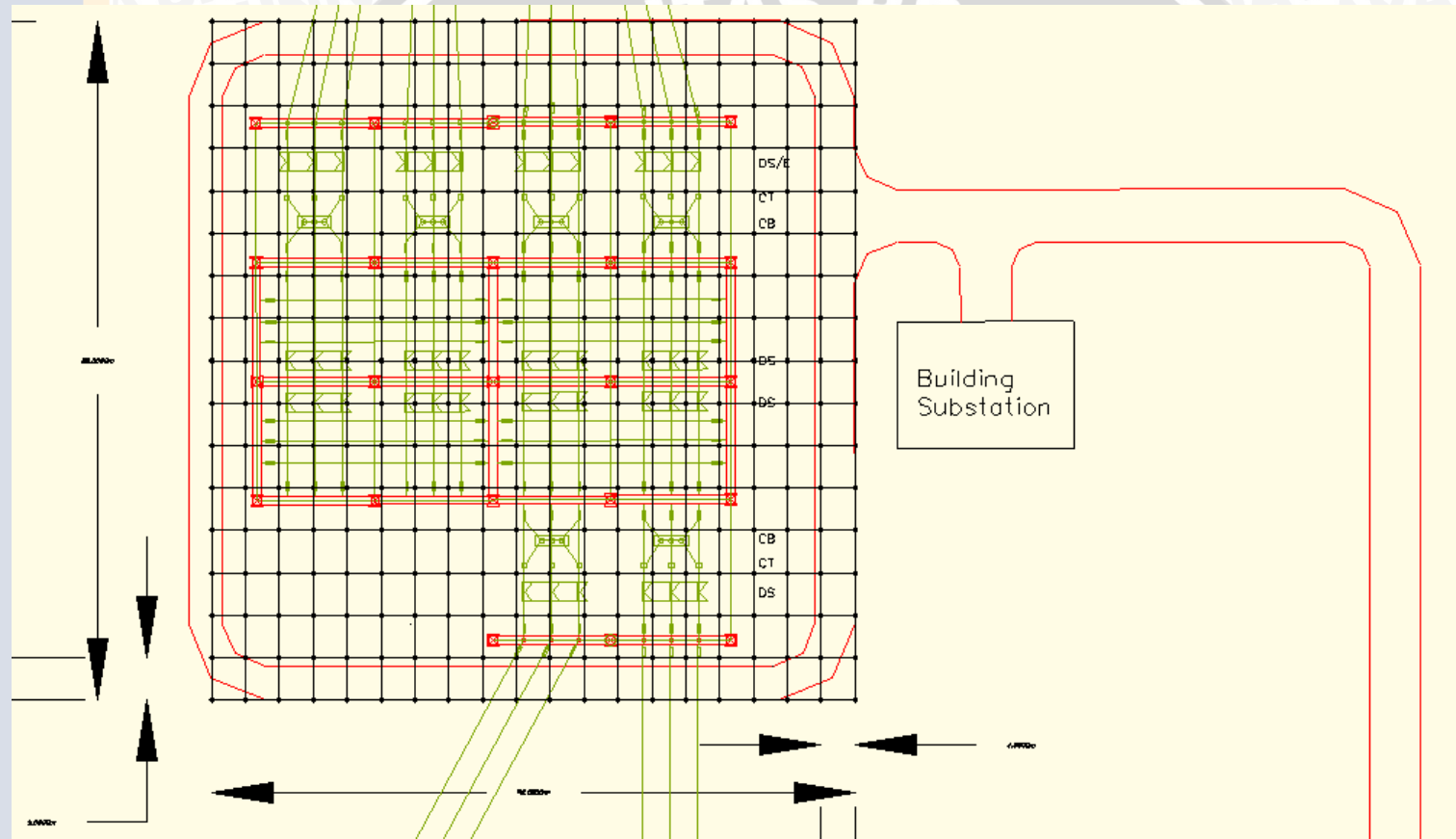
Bare Copper Solid or Stranded Conductor (Hard Drawn)

Nominal Sectional Area	Number & Diameter of Wire	Overall Diameter	Maximum Conductor Resistance @ 20°C	Breaking Strength	Allowable Ampacities in Free Air	Cable Weight (approx)	Standard Packing
mm ²	No. / mm	mm	Ω / km	kgf	A	kg / km	m
10	7/1.35	4.05	1.8054	438	90	90	1,000/R
16	7/1.70	5.10	1.1385	694	125	143	1,000/R
25	7/2.14	6.42	0.7185	1,076	160	227	1,000/R
35	7/2.52	7.56	0.5181	1,459	200	314	1,000/R
50	7/3.02	9.06	0.3589	2,095	250	452	1,000/R
50	19/1.78	8.90	0.3825	2,021	250	428	1,000/R
70	19/2.14	10.70	0.2646	2,921	310	618	1,000/R
95	19/2.52	12.60	0.1919	3,961	380	858	1,000/R
120	19/2.85	14.25	0.1492	5,067	440	1,097	1,000/R
150	37/2.25	15.75	0.1238	6,289	510	1,334	1,000/R
185	37/2.52	17.64	0.0981	7,713	585	1,673	1,000/R
240	61/2.25	20.25	0.0752	10,369	700	2,200	1,000/R
300	61/2.52	22.68	0.0600	12,717	800	2,760	1,000/R
400	61/2.85	25.65	0.0469	16,266	900	3,350	1,000/R
500	61/3.20	28.80	0.0370	20,506	1,110	4,451	1,000/R

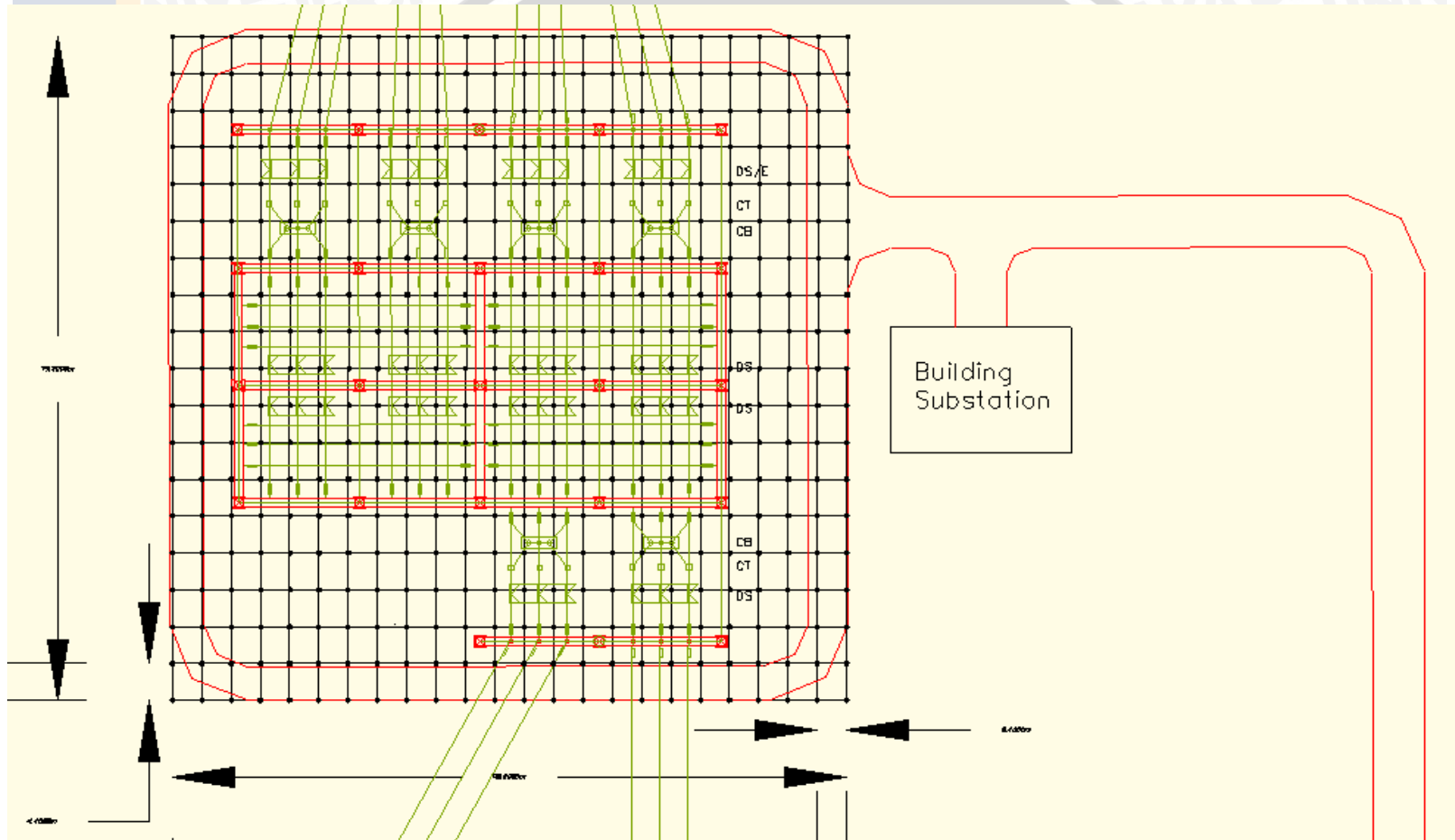
R = Packing in reel

LAYOUT PERANCANGAN
SISTEM PENGETANAHAN
PERALATAN DI GARDU
INDUK





Layout Perancangan Grid-Rod 1



Layout Perancangan Grid-Rod 2