

KARYA ILMIAH

**STUDI SISTEM PEMBUMIHAN *GRID SWITCHYARD*
PADA GARDU INDUK**



OLEH :

YANCE SYARIEF

NIP : 131 622 009

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2005**

ABSTRAK

Terjadinya gangguan fasa ke tanah pada Gardu Induk / *switchyard* Tegangan Tinggi (GITT) 150 KV akan menyebabkan mengalirnya arus gangguan pada bagian peralatan dan ke piranti pembumian. Hal ini akan menimbulkan gradien tegangan yang berbahaya bagi keselamatan manusia yang berada di area *switchyard* / Gardu Induk. Untuk mengkompensasi hal tersebut diperlukan sistem pembumian peralatan yang handal.

Pembumian sistem *grid* efektif untuk membatasi tegangan sentuh, tegangan langkah, dan menghasilkan resistansi pembumian yang rendah. Sistem pembumian *Grid* merupakan pembumian dengan konduktor yang menghubungkan badan peralatan dengan tanah yang di tanam sejajar dengan permukaan tanah secara paralel bersilangan.

Karya ilmiah ini menguraikan perbandingan resistansi pembumian *grid* terhadap hasil pengukuran resistansi pembumian di lapangan dengan hasil perhitungan resistansi pembumian secara teoritis pada sistem pembumian *grid switchyard* / Gardu Induk (GITT) 150 KV yang didasarkan sesuai *standard* pembumian *IEEE/ANSI 80-1986*.

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis ucapkan kehadiran ALLAH SWT, yang telah melimpahkan Rahmad dan karuniaNya, serta solawat dan salam penulis ucapkan kepada junjungan kita Nabi besar MUHAMMAD SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ilmiah ini dengan judul :

Studi Sistem Pembumian *Grid Switchyard* Pada Gardu Induk

Atas selesainya karya ilmiah ini, yang disusun dengan usaha yang maksimal dengan harapan karya ilmiah ini berguna bagi penulis sendiri maupun kalangan pembaca.

Dalam pelaksanaan pembahasan ilmiah hingga terwujudnya tulisan ini, penulis banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini penulis tidak lupa menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu sehingga selesainya penulisan karya ilmiah ini.

Akhir kata penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi penulis dan siapa saja yang membutuhkannya. Amin.

Medan, 2005
Penulis

Yance Syarief
NIP: 131 622 009

DAFTAR ISI

Lembaran Judul.....	i
Abstrak.....	ii
Kata Pengantar.....	iii
Daftar Isi	iv

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penulisan	2
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	3

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Gardu Induk.....	5
2.1.1. Klasifikasi Gardu Induk	6
2.1.2. Jenis Peralatan Gardu Induk.....	7
2.2. Pembumian Gardu Induk	8
2.3. Metode Pembumian	10
2.3.1. Pembumian Dengan Sistem Vertikal	10
2.3.2. Pembumian Dengan Sistem Horizontal	12
2.3.3. Pembumian Sistem Grid	13
2.4. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Tahanan Pembumian	13
2.4.1. Tahanan Jenis Tanah	14
2.4.2. Jenis Tanah.....	15
2.4.3. Kelembaban Tanah.....	15
2.5. Pengukuran Tahanan Jenis Tanah	16
2.5.1. Metoda empat elektroda (<i>four electrode methode</i>)	17
2.5.2. Metoda tiga titik (<i>three point methode</i>).....	19
2.6. Metode Memperbaiki Nilai Tahanan Pembumian	20
2.6.1. Memparalelkan beberapa buah batang elektroda	21
2.6.2. Pembumian dengan kisi-kisi (<i>grid</i>)	21
2.6.3. Kombinasi pembumian <i>grid</i> dan <i>rod</i>	22
2.7. Bahaya-bahaya Yang Timbul Pada Gardu Induk Pada Keadaan Gangguan Tanah.....	22
2.7.1. Tahanan Tubuh Manusia.....	23

2.7.2. Arus melalui Tubuh Manusia.....	25
2.7.2.1. Arus persepsi	26
2.7.2.2. Arus Mempengaruhi Otot	26
2.7.2.3. Arus Fibrilasi.....	27
2.7.2.4. Arus Reaksi	29
2.7.3. Tegangan	30
2.8. Parameter Pembumian <i>Switchyard</i> /Gardu Induk	31
2.8.1. Resistansi Pembumian	31
2.8.2. Arus <i>Grid</i> Maksimum	36
2.8.3. Tegangan Sentuh Yang Diizinkan.....	37
2.8.4. Tegangan Langkah Yang Diizinkan.....	40
2.8.5. Tegangan Sentuh Yang Sebenarnya(Tegangan <i>Mesh</i>) ...	42
2.8.6. Tegangan Langkah Yang Sebenarnya	44
 BAB III	
METODOLOGI PEMBAHASAN DAN PENYELESAIAN	
3.1. Lokasi Pengambilan Data.....	45
3.2. Variabel Pengamatan.....	45
3.3. Data Pengamatan.....	45
3.4. <i>Flow Chart</i> Pembahasan	48
 BAB IV	
GANGGUAN AKIBAT LEPASAN PARSIAL DIDALAM SAMBUNGAN KABEL TIPE BEBAT	
4.1. Umum	49
4.2. Prosedur Perhitungan Resistansi Sistem Pembumian <i>Grid Switchyard</i> Pada Gardu Induk	50
4.3. Hasil Analisa Perhitungan Resistansi Sistem Pembumian <i>Grid Switchyard</i> Pada Gardu Induk	51
 BAB V KESIMPULAN.....	53
 DAFTAR PUSTAKA	54

ABSTRAK

Terjadinya gangguan fasa ke tanah pada Gardu Induk / *switchyard* Tegangan Tinggi (GITT) 150 KV akan menyebabkan mengalirnya arus gangguan pada bagian peralatan dan ke piranti pembumian. Hal ini akan menimbulkan gradien tegangan yang berbahaya bagi keselamatan manusia yang berada di area *switchyard* / Gardu Induk. Untuk mengkompensasi hal tersebut diperlukan sistem pembumian peralatan yang handal.

Pembumian sistem *grid* efektif untuk membatasi tegangan sentuh, tegangan langkah, dan menghasilkan resistansi pembumian yang rendah. Sistem pembumian *Grid* merupakan pembumian dengan konduktor yang menghubungkan badan peralatan dengan tanah yang di tanam sejajar dengan permukaan tanah secara paralel bersilangan.

Karya ilmiah ini menguraikan perbandingan resistansi pembumian *grid* terhadap hasil pengukuran resistansi pembumian di lapangan dengan hasil perhitungan resistansi pembumian secara teoritis pada sistem pembumian *grid switchyard* / Gardu Induk (GITT) 150 KV yang didasarkan sesuai *standard* pembumian *IEEE/ANSI 80-1986*.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembumian dapat dibedakan atas dua bagian, yaitu pembumian titik netral sistem dan pembumian peralatan. Pembumian peralatan adalah penghubungan badan dari peralatan listrik dengan tanah melalui piranti pembumian yang pada keadaan normal tidak teraliri arus. Tujuannya untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang dialiri arus dan antara bagian-bagian ini dengan tanah sampai tingkat yang aman pada keadaan normal maupun pada saat terjadi gangguan tanah.

Gangguan fasa ke tanah pada Gardu Induk akan menyebabkan mengalirnya arus gangguan tanah (*Ground Fault Current*). Arus gangguan akan mengalir pada peralatan yang terbuat dari metal dan menuju ke piranti pembumian. Hal ini akan menimbulkan gradien tegangan di antara peralatan dengan peralatan, peralatan dengan tanah, dan gradien tegangan pada permukaan tanah itu sendiri yang berbahaya bagi keselamatan manusia yang berada disekitar area *switchyard*. Untuk mencegah hal tersebut diperlukan sistem pembumian yang handal dan efektif yang mampu meratakan gradien tegangan yang timbul agar aman untuk manusia.

Dengan adanya sistem pembumian ini, semua bagian peralatan dan permukaan tanah diharapkan mempunyai tegangan yang merata terutama pada saat terjadi hubung singkat ke tanah sehingga tidak membahayakan orang yang berada di sekitar area *switchyard* tersebut.

Sistem pembumian elektroda yang sekarang banyak digunakan untuk pembumian *switchyard* / Gardu Induk adalah pembumian dengan sistem *Grid* (*network*). Karena sistem ini terbukti efektif untuk meratakan tegangan di permukaan tanah dan menghasilkan resistansi pembumian yang relatif rendah.

1.2 Perumusan Masalah

Supaya lebih terarah dan terinci penulisan karya ilmiah ini, maka penulis membuat suatu rumusan masalah, diantaranya adalah:

- a. Sistem pembumian *switchyard* menggunakan sistem *Grid*
- b. Menentukan dan membandingkan hasil perhitungan resistansi pembumian *switchyard* sistem *grid* dengan hasil pengukuran resistansi pembumian *grid* lapangan.

1.3 Tujuan Penulisan

Dalam penulisan karya ilmiah ini penulis membuat tujuan agar lebih terarah dan terinci antara lain:

- a. Mengetahui sistem pembumian *switchyard* dengan metode sistem *Grid*.
- b. Mengetahui perhitungan dan hasil perhitungan resistansi pembumian *switchyard* dengan sistem *grid*.

1.4 Batasan Masalah

Mengingat kemampuan penulis terbatas, maka penulis membuat batasan masalah antara lain:

- a. Membahas sistem pembumian *switchyard* dengan sistem *Grid*.
- b. Membahas penentuan/perhitungan nilai resistansi pembumian *grid* pada *switchyard*.
- c. Tidak membahas faktor – faktor yang menyebabkan terjadinya gangguan pada gardu induk.
- d. Tidak membahas karakteristik peralatan gardu induk.

1.5 Sistematika Penulisan

Isi dari penulisan karya ilmiah ini meliputi lima bab yang secara garis besar berisi:

BAB I berisi pendahuluan yang membahas tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II berisi tentang landasan teori yang meliputi; Gardu Induk, pembumian gardu induk, metode pembumian, faktor-faktor yang mempengaruhi tahanan pembumian, pengukuran tahanan jenis tanah, metode memperbaiki nilai tahanan pembumian, bahaya-bahaya yang timbul pada GI pada keadaan gangguan tanah, parameter pembumian *switchyard*.

BAB III berisi tentang metode pembahasan yang meliputi; lokasi pengambilan data, variabel data, prosedur pembahasan, data-data sistem pembumian gardu induk, diagram alir (*flow chart*) pembahasan.

BAB IV berisi tentang hasil pembahasan yang meliputi hasil-hasil perhitungan.

BAB V berisi tentang kesimpulan dan saran yang akan ditarik dari penulisan karya ilmiah ini.

BAB. II **LANDASAN TEORI**

2.1 Gardu Induk

Gardu Induk adalah suatu tempat terpasangnya beberapa peralatan-peralatan sistem tenaga listrik yang pada hakekatnya peralatan-peralatan tersebut dirangkai dengan sistem Jaringan Tegangan Ekstra Tinggi (JTET), Jaringan Tegangan Tinggi (JTT), maupun dengan Sistem Tegangan Menengah (JTM).

Fungsi Gardu Induk tersebut membuat peranan dan tanggung jawab yang besar terhadap pelayanan listrik kepada konsumen. Gardu Induk ini sangat berguna dalam sistem tenaga listrik karena dapat mengurangi kerugian daya terutama transmisi yang sangat panjang.

Sebagai fungsi dari Gardu Induk tersebut adalah :

- Menstransformasikan tenaga pada suatu tingkat tegangan ke tingkat tegangan yang lainnya.
- Pengukuran, pengawasan operasi serta pengaturan pengamatan sistem tenaga listrik.
- Pengukuran daya ke Gardu Induk lain dan ke gardu-gardu distribusi melalui *feeder-feeder* dari tegangan menengah.

2.1.1 Klasifikasi Gardu Induk

Gardu induk biasanya diklasifikasikan menurut jenis pasangan luar (*outdoor*), jenis pasangan dalam (*indoor*), jenis setengah pasangan luar (*semi out door*), dan jenis pasangan bawah tanah.

- Jenis Pasangan Luar (*out door*).

Terdiri dari peralatan tinggi pasangan luar, misalnya transformator, peralatan penghubung, rel daya, dan sebagainya dipasang di udara terbuka sedangkan peralatan kontrolnya terdapat di dalam ruangan. Semua peralatan Gardu Induk di atas dipasang di luar bangunan kecuali ruangan kontrol, alat pengukuran dan alat bantu. Jenis pasangan luar ini memerlukan tanah yang luas, namun biaya konstruksinya dan pendinginnya mudah. Karena itu Gardu Induk jenis ini biasanya dipakai di pinggiran kota.

- Jenis Pasangan Dalam (*in door*).

Semua peralatan dalam Gardu Induk seperti rel pemisah, pemutus tenaga, transformator, dan peralatan kontrolnya dipasang di dalam ruangan tertutup atau bangunan.

- Jenis Setengah Pasangan Luar (*semi out door*).

Sebagian dari peralatan tegangan tinggi terpasang di dalam gedung dan disebut juga jenis setengah pasangan dalam. Jenis ini dipakai bermacam-macam corak dengan pertimbangan-pertimbangan ekonomis, pencegahan gangguan suara, pencegahan kebakaran dan sebagainya.

- Jenis Pasangan Bawah Tanah.

Dalam jenis ini hampir semua peralatan terpasang dalam bangunan bawah tanah. Hanya alat pendingin serta ruang kontrolnya kadang-kadang terletak di atas tanah. Jenis ini biasanya terdapat di pusat kota dimana tanah sukar didapat sehingga jenis pasangan luar bawah tanah ini dipakai .

2.1.2 Jenis Peralatan Gardu Induk

Gardu Induk memiliki peralatan utama tegangan tinggi yang di tempatkan secara berurutan sesuai dengan keperluan dan fungsi setiap peralatan. Peralatan–peralatan utama yang terdapat dalam Gardu Induk anatara lain :

- Transformator Daya, adalah suatu peralatan yang berfungsi menyalurkan daya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya.
- Pemutus Tenaga (*PMT*), adalah suatu saklar yang dapat digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus/daya listrik dalam keadaan normal maupun gangguan yang sesuai dengan ratingnya. Pemutus tenaga memiliki pemadam busur api, dalam hal ini pemutus tenaga yang digunakan adalah pemutus tenaga dengan media gas *SF6*.
- Pemisah (*PMS*), adalah suatu alat yang berfungsi untuk memisahkan peralatan yang tampak secara visual dan tidak dilengkapi dengan pemadam busur api. Karena itu pemisah tidak boleh dioperasikan dalam keadaan berbeban.
- Rel Daya (*Busbar*), adalah titik temu saluran–saluran tenaga, dengan kata lain tempat menerima dan menyalurkan daya listrik.

- *Ligthing Arrester* (LA), adalah alat proteksi yang berfungsi mengamankan instalasi peralatan–peralatan listrik terhadap gangguan tegangan lebih atau gangguan hubung singkat atau gangguan arus lebih yang diakibatkan oleh sambaran petir atau surja petir.
- Transformator Tegangan (*PT*), berfungsi menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah untuk keperluan pengukuran dan pengamanan (proteksi).
- Transformator Arus (*CT*), berfungsi menurunkan arus besar menjadi arus yang lebih kecil untuk keperluan pengukuran atau pengamanan (proteksi).

2.2 Pembedaan Gardu Induk

Pembedaan adalah penghubungan titik netral dari suatu sistem tenaga listrik atau badan dari peralatan listrik dengan tanah. Kontak dengan tanah ini dilakukan dengan menanamkan konduktor ke dalam tanah.

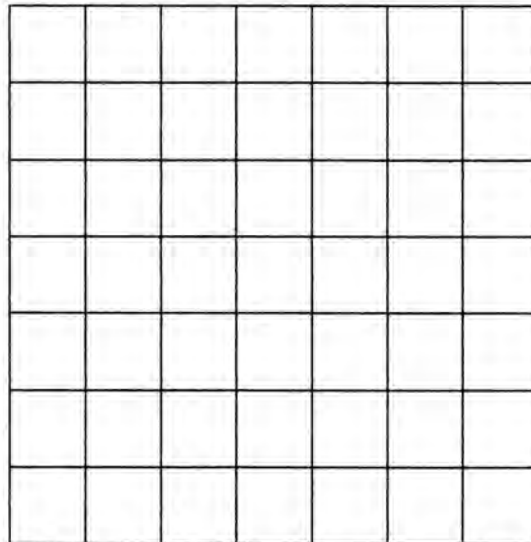
Maksud pembedaan pada Gardu Induk adalah mengusahakan agar tegangan permukaan pada halaman Gardu Induk/*Switchyard* dan sekitarnya mempunyai tegangan yang mendekati keseragaman dan nilainya mendekati nol dengan cara menghubungkan semua bagian konduktif terbuka dari peralatan Gardu Induk selalu dekat dengan tegangan tanah.

Dalam Gardu Induk selalu diusahakan agar nilai tahanan pembedaan sekecil mungkin agar drop tegangan akibat hubungan singkat (gangguan) menjadi kecil.

Namun demikian pada arus hubung singkat yang besar, sering sulit untuk memperoleh drop tegangan yang kecil, meskipun tahanan pembumiannya kecil yang dapat mengakibatkan bahaya–bahaya seperti arus yang mengalir pada tubuh manusia, tegangan sentuh, tegangan langkah dan lain–lain. Untuk mengatasi bahaya–bahaya itu usaha yang dilakukan adalah dengan membuat gradien tegangan di gardu induk pada saat hubung singkat sekecil mungkin sehingga tetap aman bagi petugas.

Untuk memperoleh gradien tegangan yang sekecil mungkin tersebut dibuatlah pembumian Gardu Induk/*Switchyard* berbentuk suatu jaringan (*network-grid*) yang terdiri dari beberapa batang konduktor sejajar yang saling berhubungan (seperti gambar 2.1). Semua bagian konduktif yang dalam keadaan normal tidak bertegangan dihubungkan pada *grid* ini, termasuk titik netral sistem.

— :
Konduktor- pembumian
ditanam saling
bersilangan.



Gambar 2.1 Grid Pembumian pada Gardu Induk

2.3 Metode Penumian

Umumnya penumian pada sistem saluran tegangan tinggi menggunakan metode sistem penumian langsung, dalam hal ini konduktor yang digunakan adalah elektroda batang yang ditanam langsung ke dalam tanah. Alasan utama pemilihan metode ini karena metode inilah yang paling murah/mempunyai biaya yang rendah yang dapat membatasi tegangan transien yang tinggi.

Pada penumian langsung ada beberapa macam metode penanaman elektroda batang penumian, diantaranya adalah:

- 1). Penumian dengan Sistem Vertikal
- 2). Penumian dengan Sistem Horizontal
- 3). Penumian dengan Sistem *Grid*

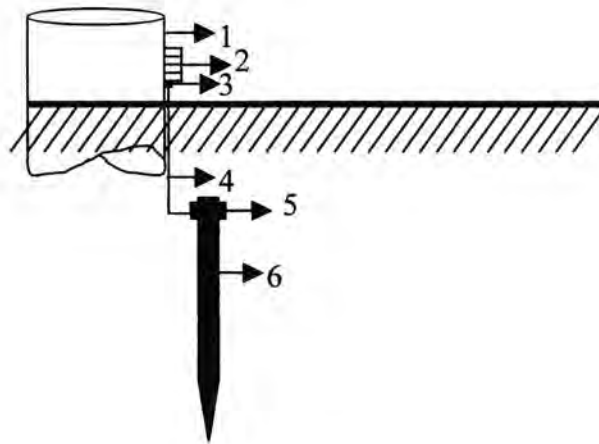
2.3.1 Penumian dengan Sistem Vertikal.

Penumian dengan sistem vertikal adalah sistem penumian dengan menggunakan batang-batang konduktor (*Rod*) yang ditanam tegak lurus dengan permukaan tanah, batang konduktor tersebut biasanya terbuat dari pipa besi atau tembaga yang tahan terhadap karat setelah dilapisi anti karat.

Penumian dengan sistem vertikal atau dengan elektroda batang yang ditanam tegak lurus (*Rod*) paling banyak digunakan dikarenakan :

- a. Harga elektroda penumiannya cukup murah .
- b. Pemasangannya mudah, cukup ditancapkan (ditanam) ke dalam tanah dengan alat pemukul atau dibuat lubang terlebih dahulu dengan bor.

- c. Pengukuran tahanan pbumian mudah dilaksanakan karena cukup dengan menghubungkan pada ujung elektroda di permukaan tanah.
- d. Apabila tahanan diperlukan masih kurang, cukup dengan memparalelkan beberapa buah batang elektroda.



Gambar 2.2 Pbumian dengan sistem vertikal

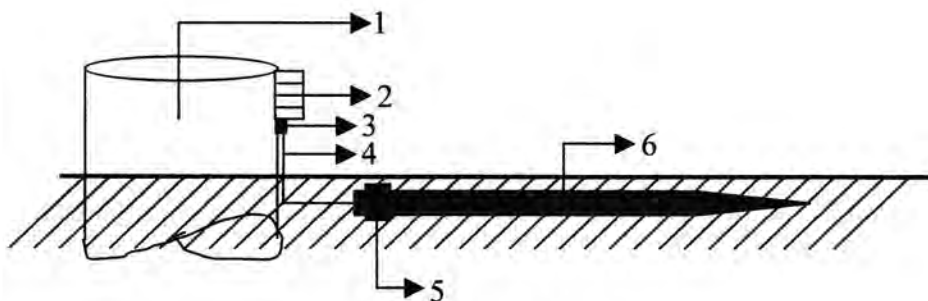
Keterangan gambar (2.2):

- 1. Piranti metal peralatan
- 2. Tabung acuan
- 3. Pengencang sambungan kawat tanah
- 4. Konduktor pbumian
- 5. Jepitan sambungan tanah
- 6. Batang elektroda pbumian

2.3.2 Pembumian dengan Sistem Horizontal

Pembumian sistem horizontal adalah sistem pembumian dengan menanamkan batang elektroda pembumian secara horizontal atau sejajar dengan permukaan tanah. Dimana dalam menanamkan batang elektroda pembumian biasanya ditanam dangkal, ukuran kedalaman dari sistem ini biasanya 50 – 100 cm dari permukaan tanah.

Sistem pembumian dengan metode horizontal ini digunakan atau dilaksanakan pada tanah yang mempunyai tahanan jenis tanah yang tinggi, jadi metode sistem pembumian horizontal ini sangat tepat dan efektif bila digunakan pada keadaan jenis tanah yang berbatu. Untuk memperoleh tahanan pembumian yang relatif rendah dapat dilakukan dengan memperpanjang batang elektroda dan ditanam lebih dalam. Berikut ini adalah contoh gambar dari sistem pembumian horizontal:



Gambar 2.3 Pembumian sistem horizontal

Keterangan gambar (2.3):

1. Piranti metal peralatan
2. Tabung acuan
3. Pengencang sambungan kawat tanah

4. Konduktor pembumian
5. Jepitan sambungan tanah
6. Batang elektroda pembumian

2.3.3 Pembumian Sistem *Grid*

Sistem pembumian pada awalnya adalah dengan menanamkan batang konduktor pembumian secara vertikal pada setiap titik, kemudian menanamkan konduktor pembumian secara horizontal, dan akhirnya dikembangkan kembali dengan menggunakan sistem *grid*. Sistem *grid* ini banyak digunakan dalam sistem pembumian gardu induk/*switchyard*. Sistem ini terbukti efektif untuk meratakan tegangan permukaan tanah, membatasi tegangan kejut yang timbul dan menghasilkan resistans pembumian yang relatif rendah.

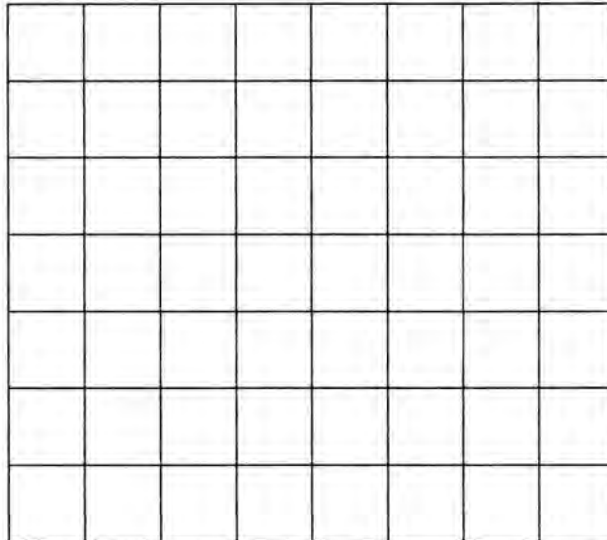
Konduktor pembumian *grid* ini ditanam sejajar dengan permukaan tanah dengan kedalaman kira-kira 30 – 80 cm. Di dalam tanah konduktor ini dihubungkan secara kisi-kisi atau secara paralel bersilangan antara 1 konduktor dengan konduktor lainnya.

Bentuk sederhana sistem pembumian *grid* seperti terlihat pada gambar 2.4 di bawah :

2.4 Faktor – Faktor Yang Mempengaruhi Tahanan Pembumian

Dalam menentukan tahanan sistem pembumian, ada beberapa faktor yang harus dipertimbangkan agar nilai tahanan sistem pembumian yang diharapkan dapat

tercapai, yaitu tahanan jenis tanah, jenis tanah (komposisi tanah), pengaruh kelembaban tanah, dan sebagainya.



Gambar 2.4. Pembedaan sistem *grid*

2.4.1 Tahanan Jenis Tanah

Faktor keseimbangan antara tahanan pembedaan dan kapasitas di sekelilingnya adalah tahanan jenis tanah yang direpresentasikan dengan ρ . Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung dari beberapa faktor, yaitu ;

- a. Jenis tanah : Tanah liat, berpasir, berbatu, dan lain-lain.
- b. Lapisan tanah : berlapis-lapis dengan tahanan jenis tanah berlapis atau *uniform*.
- c. Kelembaban tanah.

d. Temperatur.

Untuk menghitung tahanan jenis tanah dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut :

$$\rho = 4\pi AR \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana : ρ = Tahanan jenis tanah (ohm.meter)

R = Tahanan (ohm)

A = Jarak diantara elektroda yang berdekatan (meter)

2.4.2 Jenis Tanah

Berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Listrik Indonesia 1987 (PUIL 1987), jenis tanah seperti berpasir, berbatu, tanah liat, dan lain-lain, mempengaruhi besar tahanan jenis tanah. Berikut ini adalah tabel resistansi jenis tanah:

Tabel 1.1 Resistansi Jenis Tanah

Jenis Tanah	Resistansi Jenis Tanah (ohm.meter)
Tanah Rawa	30
Tanah Liat dan Tanah Ladang	100
Pasir Basah	200
Kerikil Basah	500
Pasir dan kerikil Kering	1000
Tanah Berbatu	3000

2.4.3 Kelembaban Tanah

Disamping dipengaruhi oleh jenis tanah, tahanan pembumian juga dipengaruhi oleh kelembaban tanah. Karena harga jenis tahanan tanah diperoleh oleh

konsentrasi air tanah. Pada harga kelembaban yang rendah, tahanan jenis tanah ini besar. Sebaliknya semakin besar konsentrasi air di dalam tanah maka tahanan jenis tanahnya akan semakin kecil.

Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut, dimana proses mengalirnya arus listrik di dalam tanah sebagian besar adalah karena proses elektrolisis, oleh karena itu konsentrasi air dalam tanah akan mempengaruhi konduktifitas atau daya hantar listrik tanah tersebut.

Tanah yang kering atau dengan konsentrasi tanah yang rendah dibawah 10 %, mempunyai tahanan jenis tanah yang besar atau dengan kata lain berupa isolator yang baik. Suatu hal baik dari hubungan antara tahanan jenis tanah menunjukkan adanya kejenuhan untuk kelembaban diatas 15 %, kenaikan pada kelembaban tidak banyak mempengaruhi tahanan jenis tanah. Harga tahanan jenis tanah yang biasanya dipakai adalah harga dibawah harga jenuh tersebut. Oleh karena itu, penting bagi kita untuk menanamkan elektroda pembedaan pada tempat yang berhubungan langsung dengan air tanah. Untuk melakukan ini elektroda–elektroda pembedaan ditanamkan pada tempat–tempat yang cukup dalam di bawah permukaan lapisan tanah. Dengan demikian, maka pengaruh perubahan musim terhadap tahanan jenis tanah atau terhadap tahanan pembedaan elektroda dapat diperkecil.

2.5 Pengukuran Tahanan Jenis Tanah

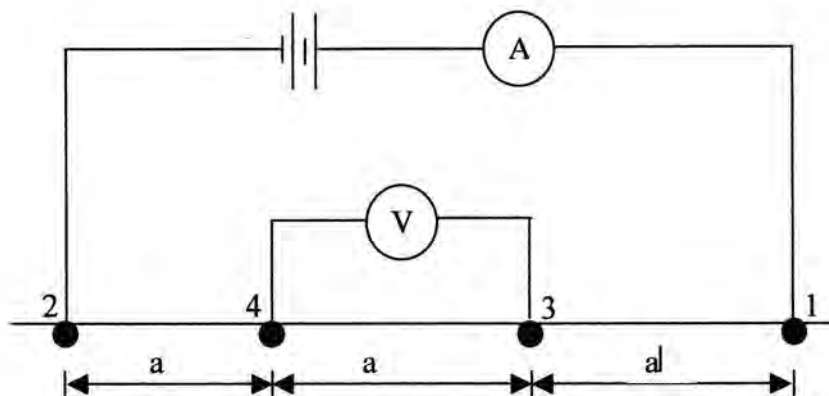
Pengukuran tahanan jenis tanah biasanya dilakukan dengan :

- 1). Metoda empat elektroda (*four electrode methode*).

2). Metoda tiga titik (*three point methode*).

2.5.1 Metoda empat elektroda (*four electrode methode*)

Pengukuran tahanan jenis tanah dengan metoda empat elektroda, menggunakan empat elektroda, sebuah baterai, amperemeter, dan sebuah voltmeter yang sensitif pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.5 Pengukuran tahanan jenis tanah dengan metoda empat elektroda.

Bila arus I masuk kedalam tanah melalui salah satu elektroda dan kembali ke elektroda lain yang cukup jauh jaraknya maka pengaruh diameter konduktor dapat diabaikan. Arus yang masuk ke tanah mengalir secara radial dari elektroda. Jika dimisalkan arus dalam tanah dari elektroda 1 ke elektroda 2 berbentuk permukaan bola dengan jari-jari r , luas permukaannya adalah $2\pi r^2$ dan rapat arus radial pada

jarak r adalah :
$$J = \frac{I}{2\pi r^2}$$

Bila ρ adalah tahanan jenis tanah , maka kuat medan dalam tanah pada arah *radial* dengan jarak (r) adalah : $E(r) = j$

Jadi :

$$E(r) = \frac{I \rho}{2 \pi r^2} \dots\dots\dots(2.2)$$

Potensial pada jarak r dari elektroda adalah integral dari gaya listrik dari r ke titik tak terhingga :

$$V = \int_r^{\infty} E(r) dr = \frac{I \rho}{2 \pi r} \dots\dots\dots(2.3)$$

Perbandingan antara tegangan dan arus atau tahanan menjadi :

$$R = \frac{\rho}{2 \pi r} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dari gambar di atas dapat dilihat , $r_{13} = r_{34} = r_{24} = a$

Jadi :

$$V_3 = \frac{I \rho}{2 \pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right]$$

Dan

$$V_4 = \frac{I \rho}{2 \pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right] \dots\dots\dots(2.5)$$

Beda tegangan antara titik 3 dan 4 adalah :

$$V_{34} = \frac{I \rho}{2 \pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right]$$

$$= \frac{I \rho}{2 \pi a} \dots\dots\dots (2.6)$$

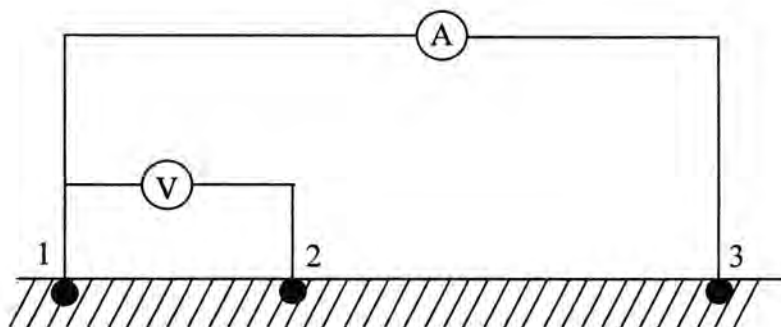
Dan

$$R_{34} = \frac{V_{34}}{I} = \frac{\rho}{2 \pi a}$$

$$\text{Jadi } \rho = 2 \pi a R_{34} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.5.2 Metoda tiga titik (*three point methode*)

Metoda tiga titik (*three point methode*) dimaksudkan untuk mengukur tahanan pembumian. Misalkan tiga buah tahanan pembumian dimana batang pertama yang tahanannya hendak diukur dan batang-batang 2 dan 3 sebagai batang pembumian pembantu yang belum diketahui harga tahanannya seperti pada gambar berikut ini:



Gambar 2.6 Pengukuran dengan metoda tiga titik

Bila tahanan di antara tiap-tiap pembumian diukur dengan arus konstan, tiap pengukuran dapat ditulis sebagai berikut:

$$R_{1-2} = \frac{V_{1-2}}{I} = R_{11} + R_{22} - 2 R_{12}$$

$$R_{1-3} = \frac{V_{1-3}}{I} = R_{11} + R_{33} - 2 R_{13}$$

$$R_{2-3} = \frac{V_{2-3}}{I} = R_{22} + R_{33} - 2 R_{23}$$

$$\frac{V_{1-2} + V_{1-3} - V_{2-3}}{I} = 2 R_{11} - 2 R_{12} - 2 R_{13} + 2 R_{23} \dots \dots \dots (2.8)$$

Tetapi:

$$V_{1-3} = V_{1-2} + V_{2-3}$$

Jadi:

$$R = \frac{V_{1-2}}{I} = R_{11} - R_{12} - R_{13} + R_{23}$$

Akhirnya:

$$R_{11} = R + R_{12} + R_{13} - R_{23} \dots \dots \dots (2.9)$$

2.6 Metode Memperbaiki Nilai Tahanan Pembumian

Nilai tahanan pembumian yang diinginkan adalah tahanan yang cukup rendah, agar tegangan sentuh maupun tegangan langkah tidak terlalu tinggi serta membahayakan dan juga agar sistem pengamanan lainnya dapat bekerja dengan baik. Sesuai dengan faktor-faktor yang mempengaruhi tahanan pembumian di atas, maka dapat diperoleh tindak lanjut dalam memperkecil nilai tahanan pembumian antara lain:

1. Memparalelkan beberapa buah batang elektroda
2. Dengan pembedaan kisi-kisi (*grid*)
3. kombinasi pembedaan *grid* dan *Rod*.

2.6.1 Memparalelkan beberapa buah batang elektroda

Dengan menanam satu batang elektroda kadang-kadang tidak diperoleh tahanan yang rendah, maka untuk mendapatkan tahanan yang rendah pada umumnya dilaksanakan dengan memparalelkan beberapa batang elektroda.

Penanaman elektroda batang yang dihubungkan secara paralel tidak boleh berdekatan satu sama lainnya, karena penanaman elektroda yang berdekatan satu sama lain, daerah tahanannya akan saling menutupi tahanan total dari pembedaan itu sendiri. Elektroda yang diparalel dengan jarak yang dekat tidak akan mendapatkan tahanan yang diharapkan bila dibanding dengan penanaman elektroda pada jarak-jarak tertentu, untuk memperoleh tahanan pembedaan yang diinginkan, jarak satu sama lain paling sedikit dua kali panjang elektroda yang ditanamkan ke dalam tanah.

2.6.2 Pembedaan dengan kisi-kisi (*grid*)

Pembedaan pada gardu induk banyak dilakukan dengan menanamkan batang konduktor (elektroda) sejajar dengan permukaan tanah, hal ini dilakukan untuk mempermudah penanaman elektroda pembedaan karena biasanya permukaan tanah atau komposisi tanah pada gardu induk (*switchyard*) pada umumnya lapisan tanah berbatu. Tujuan dari pada pembedaan kisi-kisi (*grid*) ini adalah untuk mendapatkan

tahanan pembumian yang cukup kecil sehingga gradien tegangan yang timbul pada permukaan tanah akan lebih kecil.

2.6.3 Kombinasi pembumian *grid* dan *rod*

Sistem pembumian peralatan pada gardu induk / *switchyard* disini menggunakan konduktor yang ditanam secara horizontal dan dikombinasi dengan pembumian *grid*. Luas kisi-kisi di daerah gardu induk / *switchyard* sesuai dengan peralatan listrik yang ada. Kisi-kisi pembumian bersambungan satu sama lainnya serta dikombinasikan dengan batang elektroda pembumian yang terdiri dari batang tembaga yang berdiameter "D" serta ditanam dengan kedalaman minimal dua kali batang pembumian yang ditanam kedalam tanah yang disebut dengan titik pembumian. Untuk pembumian peralatan pada gardu induk / *switchyard* digunakan batang elektroda pembumian yang mempunyai luas penampang yang sama dengan luas penampang pembumian *grid*.

2.7 Bahaya-bahaya Yang Timbul Pada Gardu Induk Pada Keadaan Gangguan Tanah

Secara umum kita tinjau terlebih dahulu bahaya-bahaya yang mungkin dapat ditimbulkan oleh tegangan/arus listrik terhadap manusia mulai dari yang ringan sampai yang paling berat, yaitu: terkejut, pingsan, dan mati.

Ringan atau berat bahaya yang timbul, tergantung dari faktor-faktor di bawah ini:

1. Tahanan tubuh pada manusia
2. Besarnya arus yang melewati tubuh manusia
3. Tegangan dan kondisi orang terhadap tersebut

2.7.1 Tahanan Tubuh Manusia

Tubuh manusia terdiri dari unsur-unsur air, garam mineral dan lain-lain yang kadarnya dapat saja berubah setiap saat. Maka untuk menentukan tahanan tubuh yang tetap sebenarnya sulit. Karena pengukuran terhadap tahanan tubuh dapat dipengaruhi beberapa faktor antara lain:

a. Keadaan Otot

Tubuh yang atletis misalnya memiliki otot-otot yang banyak dan padat, sehingga merupakan penghantar yang baik maka impedansinya rendah.

b. Kelembaban Kulit

Kulit yang kering mempunyai impedansi yang tinggi dibandingkan dengan kulit yang basah. Impedansi kulit akan menurun jika keadaan lembab atau basah oleh keringat.

c. Berat Badan

Badan gemuk mempunyai luas permukaan yang besar, sehingga impedansinya rendah.

d. Jenis Kelamin

Pada umumnya otot pria lebih banyak dari otot wanita jika ditinjau pada keadaan yang sama. Maka impedansi tubuh pria lebih rendah dibandingkan tubuh wanita.

e. Jenis Elektroda Pengukuran

Semakin luas permukaan kontak tubuh terhadap konduktor yang digunakan menjadikan impedansi tubuh yang diukur menjadi lebih rendah dan sebaliknya.

f. Tegangan Pengukuran

Tegangan pengukuran yang digunakan dalam pengukuran tahanan tubuh sebaiknya dibatasi jangan sampai menyakiti orang yang diukur. Hasil pengukuran membuktikan bahwa semakin tinggi tegangan sentuh yang diberikan menghasilkan impedansi tubuh yang semakin rendah.

Dari beberapa percobaan yang telah dilakukan tahanan tubuh manusia bervariasi tergantung dari tegangan, keadaan kulit pada tempat kontak dan jalannya arus dalam tubuh. Kulit yang terdiri dari lapisan tanduk mempunyai tahanan yang tinggi tetapi terhadap tegangan tinggi kulit yang menyentuh konduktor langsung terbakar, jadi tahanan kulit ini tidak berarti apa-apa. Jadi hanya tahanan tubuh yang dapat membatasi arus.

Penyelidikan dan penelitian tahanan tubuh manusia yang diperoleh beberapa ahli ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.2 Berbagai Harga Tahanan Tubuh Manusia

Peneliti	Tahanan	Keterangan
Dalziel	500	Dengan tegangan 60 cps
<i>AIEE Commitee Report</i> 1958	2330	Dengan tegangan 21 volt, tegangan keterangan = 9 mA
	1130	Tangan ke kaki
	1680	Tangan ke tangan arus searah
	800	Tangan ke kaki 50 cps
Laurent	3000	

Berdasarkan hasil penelitian di atas sebagai pendekatan diambil harga tahanan tubuh manusia sebesar 1000 ohm.

2.7.2 Arus melalui Tubuh Manusia

Kemampuan tubuh manusia terhadap besarnya arus yang mengalir di dalamnya. Tetapi berapa besar dan lamanya arus yang masih dapat ditahan oleh tubuh manusia sampai batas yang belum membahayakan sukar ditetapkan. Dalam hal ini telah banyak diselediki oleh para ahli dengan berbagai macam percobaan baik dengan tubuh manusia sendiri maupun menggunakan binatang tertentu. Dalam batas-batas tertentu dimana besarnya arus belum berbahaya terhadap organ tubuh manusia telah diadakan berbagai percobaan terhadap beberapa orang sukarelawan yang menghasilkan batas-batas besarnya arus dan pengaruhnya terhadap tubuh manusia yang berbadan sehat.

Batas-batas arus tersebut dibagi sebagai berikut:

1. Arus mulai terasa atau persepsi (*perception current*)
2. Arus mempengaruhi otot (*let-go current*)
3. Arus mengakibatkan pingsan atau mati arus fibrilasi (*fibrillating current*)
4. Arus reaksi (*reaction current*)

2.7.2.1 Arus persepsi

Bila orang memegang penghantar yang diberi tegangan mulai dari harga nol dan dinaikkan sedikit demi sedikit, arus listrik yang melalui tubuh orang tersebut akan memberi pengaruh. Mula-mula akan merangsang syaraf sehingga akan terasa suatu getaran yang tidak berbahaya, bila dengan arus bolak balik. Tetapi bila dengan arus searah akan terasa sedikit demi sedikit panas pada telapak tangan.

Pada *Electrical Testing Laboratory New York* tahun 1933 telah dilakukan pengujian terhadap 40 orang laki-laki dan perempuan, dan didapat arus rata-rata yang disebut *threshold of perception current* sebagai berikut:

- Untuk laki-laki : 1,1 mA
- Untuk perempuan : 0,7 mA

2.7.2.2 Arus Mempengaruhi Otot

Bila tegangan yang menyebabkan terjadinya tingkat arus persepsi dinaikkan lagi maka orang akan merasa sakit dan kalau terus dinaikkan lagi maka otot-otot akan

kaku sehingga orang tersebut tidak berdaya lagi untuk melepaskan konduktor yang dipegangnya itu.

Di *University of California Medical School* telah dilakukan penyelidikan terhadap 134 laki-laki dan 28 orang perempuan dan diperoleh angka rata-rata dari arus yang mempengaruhi otot sebagai berikut:

- Untuk laki-laki : 16 mA
- Untuk perempuan : 10,5 mA

Berdasarkan penelitian ini telah ditetapkan batas arus maksimal dimana orang masih dapat dengan segera melepaskan konduktor bila terkena arus listrik, sebagai berikut:

- Untuk laki-laki : 9 mA
- Untuk perempuan : 6 mA

2.7.2.3 Arus Fibrilasi

Apabila arus yang melewati tubuh manusia lebih besar dari arus yang mempengaruhi otot dapat mengakibatkan orang menjadi pingsan bahkan sampai mati. Hal ini disebabkan arus listrik tersebut mempengaruhi jantung yang disebut *ventricular fibrillation* yang menyebabkan jantung berhenti bekerja dan peredaran darah tidak jalan dan orang akan segera mati. Untuk menyelidiki keadaan ini tidak mungkin dilakukan terhadap manusia. Untuk mendapatkan nilai pendekatan suatu percobaan telah dilakukan pada *University Of California* oleh **Dalziel** pada tahun

1968, dengan menggunakan binatang yang mempunyai badan dan jantung yang kira-kira sama dengan manusia. Dari percobaan tersebut Dalziel menarik kesimpulan bahwa 99,5 % dari semua orang yang beratnya lebih kurang 50 kg masih dapat bertahan terhadap besar arus dan waktu yang ditentukan oleh persamaan sebagai berikut:

$$K = I_k^2 \cdot t \dots\dots\dots (2.10)$$

Atau;

$$I_k = k/\sqrt{t}$$

Dimana:

$$k = \sqrt{K}$$

$$K = 0,0135 \text{ untuk manusia dengan berat 50 kg}$$

$$= 0,0246 \text{ untuk manusia dengan berat 70 kg.}$$

Maka;

$$K_{50} = 0,116 \text{ Ampere}$$

$$K_{70} = 0,157 \text{ Ampere}$$

Jadi:

$$I_k^2 \cdot t = K$$

$$I_k^2 \cdot t = 0,0135 \text{ (untuk berat badan 50 kg)}$$

$$I_k^2 \cdot t = 0,0246 \text{ (untuk berat badan 70 kg)}$$

sehingga:

$$I_{k50} = \frac{0,116}{\sqrt{ts}} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$I_{k70} = \frac{0,157}{\sqrt{ts}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana : I_k = Besar arus lewat tubuh manusia (dalam Ampere)

ts = Waktu arus lewat tubuh manusia dan lama gangguan tanah (detik)

2.7.2.4 Arus Reaksi

Arus reaksi adalah arus yang terkecil yang dapat mengakibatkan orang menjadi terkejut, hal ini cukup berbahaya karena dapat mengakibatkan kecelakaan sampingan. Karena terkejut orang dapat jatuh dari tangga, melemparkan peralatan yang sedang dipegang yang dapat mengenai bagian-bagian instalasi bertegangan tinggi sehingga terjadi kecelakaan yang lebih fatal.

Penyelidikan yang terperinci mengenai batas-batas arus dan pengaruhnya pada manusia disusun menurut tabel 2.3 di bawah:

Tabel 2.3 Batasan-batasan arus dan pengaruhnya pada manusia

Besar Arus	Pengaruh pada Tubuh Manusia
0 – 0,9 mA	Belum dirasakan pengaruhnya,tidak menimbulkan reaksi apa-apa.
0,9 – 1,2 mA	Baru terasa adanya arus listrik, tetapi tidak menimbulkan akibat kejang, kontraksi atau kehilangan kontrol.
1,2 – 1,6 mA	Mulai terasa seakan-akan ada yang merayap didalam tangan.
1,6 – 6,0 mA	Tangan sampai ke siku mulai kesemutan.
6,0 – 13 mA	Tangan mulai kaku, rasa kesemutan makin bertambah.
13 – 15 mA	Rasa sakit tidak tertahankan , penghantar masih dapat lepas dengan gaya yang besar sekali.

15 – 20 mA	Otot tidak sanggup lagi melepas penghantar.
20 – 50 mA	Dapat mengakibatkan kerusakan pada tubuh manusia.
50 – 100 mA	Batas arus yang dapat menyebabkan kematian.

2.7.3 Tegangan

Sulit untuk menentukan secara tepat mengenai perhitungan tegangan yang mungkin timbul akibat gangguan ke tanah terhadap orang sedang di dalam gardu induk, karena banyaknya faktor yang mempengaruhi dan tidak diketahui. Untuk menganalisa keadaan ini maka diambil beberapa pendekatan sesuai dengan kondisi orang yang sedang berada di dalam gardu induk tersebut pada saat terjadi gangguan ke tanah. Pada hakekatnya perbedaan tegangan selama mengalir arus gangguan tanah dapat digambarkan sebagai:

1. **Tegangan sentuh** adalah tegangan yang terdapat pada tubuh manusia bila menyentuh suatu objek yang ada gradien tegangannya, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan kisi-kisi pembumian yang berada di bawahnya.
2. **Tegangan langkah** adalah tegangan yang timbul antara dua kaki manusia yang berdiri di permukaan tanah yang ada gradien tegangannya, dan di bawah tanah tersebut terdapat elektroda pembumian yang sedang dialiri arus gangguan ke tanah.
3. **Tegangan pindah** adalah tegangan khusus dari tegangan sentuh, dimana tegangan ini terjadi apabila pada saat terjadi gangguan orang berdiri di dalam

gardu induk dan menyentuh suatu peralatan yang dibumikan pada titik jauh sedangkan alat tersebut dialiri oleh arus gangguan tanah, orang tersebut akan merasakan tegangan yang lebih besar bila dibandingkan dengan tegangan sentuh. Tegangan pindah akan sama dengan tegangan pada tahanan kontak pembumian total.

2.8 Parameter Pembumian *Switchyard*/Gardu Induk

Desain sistem pembumian gardu induk / *switchyard* 150 Kv diupayakan untuk memenuhi tujuan utama yaitu memperoleh tahanan pembumian yang kecil dan memastikan bahwa manusia yang berada di area *switchyard* tetap aman pada keadaan gangguan fasa ke tanah.

Parameter-parameter pembumian *switchyard* tersebut antara lain adalah:

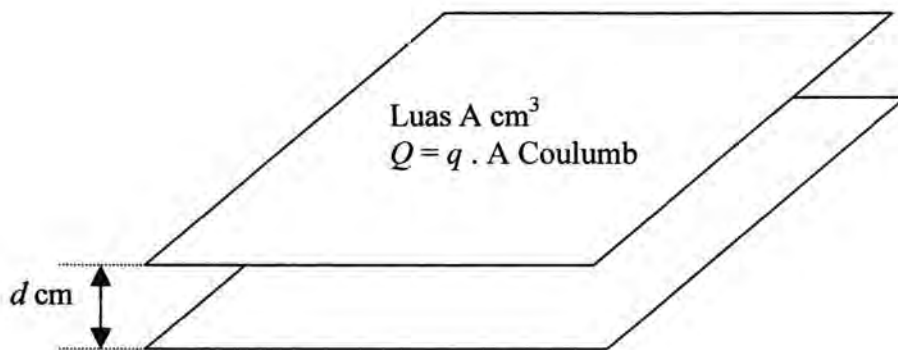
1. Resistansi pembumian
2. Arus *grid* maximum
3. Tegangan sentuh yang diizinkan
4. Tegangan langkah yang diizinkan
5. Tegangan sentuh yang sebenarnya (Tegangan *Mesh*)
6. Tegangan langkah yang sebenarnya

2.8.1 Resistansi Pembumian

Dasar perhitungan resistansi pembumian adalah perhitungan kapasitansi dari susunan-susunan batang-batang elektroda pembumian dengan anggapan bahwa

distribusi arus atau muatan *uniform* sepanjang batang elektroda. Hubungan tahanan dan kapasitansi dapat dijelaskan dengan suatu analogi. Analogi ini merupakan dasar perhitungan karena aliran arus masuk ke dalam tanah dari elektroda pembedaan mempunyai kesamaan dengan emisi fluks listrik dari konfigurasi yang sama dengan konduktor yang mempunyai muatan yang terilosir.

Misalkan dua plat konduktor dengan luas masing-masing $A \text{ cm}^2$ dengan rapat muatan plat masing-masing q/cm^2 , dan $-q/\text{cm}^2$, jarak antar plat adalah $d \text{ cm}$ yang diperlihatkan pada gambar 2.7 dibawah ini:



Gambar .2.7 Konduktor plat

Jumlah garis fluks yang melalui dielektrik diantara kedua plat adalah $4\pi q \cdot A$ dan kuat medannya adalah $4\pi q$. Maka tegangan antara kedua plat $V = 4\pi qd$ Volt, jumlah muatan Q adalah qA Coulomb.

Dari hubungan:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Diperoleh:

$$\frac{1}{C} = \frac{4\pi \cdot q \cdot d}{q \cdot A}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{4\pi \cdot d}{A} \dots\dots\dots (2.13)$$

Jika diantara kedua plat diletakkan tanah dengan tahanan jenis ρ ohm.cm

maka tahanan antara plat adalah:

$$R = \rho \frac{d}{A}$$

Dari persamaan (2.13):

$$\frac{d}{A} = \frac{1}{4 \pi C}$$

Akhirnya didapat harga tahanan:

$$R = \frac{\rho}{4 \pi C} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

R = Tahanan (dalam ohm)

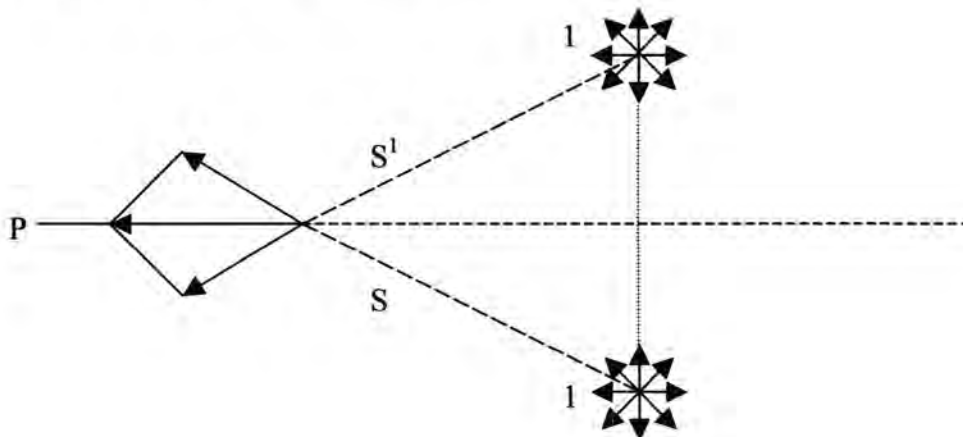
C = Kapasitansi (dalam Statfarad)

ρ = Tahanan jenis tanah (dalam ohm.cm)

Dalam hal ini tahanan elektrodanya sendiri tidak diperhitungan karena tahanan jenis konduktor kecil sekali dibandingkan dengan tahanan jenis tanah. Kalau

kita perhatikan persamaan (2.14), maka persoalannya adalah penentuan kapasitansi dari sistem pembumian untuk menentukan tahanan pembumiannya. Penentuan besar kapasitansi suatu sistem pembumian adalah dengan prinsip bayangan.

Prinsip bayangan secara sederhana dapat diterangkan sebagai berikut. Misalkan dua elektroda titik 1 dan 1 bermuatan yang sama besarnya di dalam media yang tak terbatas, dan juga dimisalkan arus I mengalir pada kedua titik tersebut seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.8 Prinsip Bayangan

Arus I akan mengalir keluar dari kedua elektroda secara *radial*. Suatu bidang bayangan terletak di tengah-tengah kedua elektroda dan tegak lurus terhadap garis hubung kedua elektroda. Karena kedua elektroda tersebut simetris terhadap bidang bayangan, maka tidak ada arus yang mengalir dalam arah tegak lurus bidang bayangan.

Perhitungan nilai resistansi pembumian gardu induk / *switchyard* 150 Kv pada penulisan karya ilmiah ini didasarkan pada rekomendasi *IEEE/ANSI* 80-1986

adalah ≤ 1 ohm. Dalam perhitungan resistansi pembumian dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa formula perbandingan, diantaranya adalah:

- Formula Dwigh

$$R_G = \frac{\rho}{4r} \dots\dots\dots (2.15)$$

- Formula Laurent dan Nieman.

$$R_G = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \dots\dots\dots (2.16)$$

- Formula Sveraks.

Untuk penanaman kedalaman konduktor adalah $0 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$ dari permukaan tanah. Nilai resistansi pembumian dapat dituliskan berupa rumus sebagai berikut:

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana ρ = Resistivitas tanah (ohm-meter)

A = Luas area pembumian (m^2)

L = Panjang total konduktor (m)

h = Kedalaman penanaman konduktor (m)

r = jari-jari ekuivalen dari luas area switchyard/area pembumian (m)

Dalam Sistem pembumian *grid*, perhitungan resistansinya lebih tepat menggunakan formula Sveraks.

2.8.2 Arus *Grid* Maksimum

Arus *grid* maksimum adalah arus terbesar yang mengalir pada rangkaian Pembumian *grid* saat terjadi gangguan fasa ke tanah. Bagian terbesar dari arus gangguan tanah yang mengalir diantara pembumian *grid* dan permukaan tanah dirumuskan sebagai berikut:

$$I_g = S_f \times I_f \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana:

I_g = Arus *grid* (Ampere)

I_f = Arus gangguan tanah simetris = $3I_0$ (Ampere)

S_f = Faktor arus yang berhubungan dengan lamannya gangguan.

Sedangkan besarnya arus *grid* (I_G) maksimum yang mengalir sepanjang pembumian *grid* pada gardu induk / *switchyard* adalah:

$$I_G = C_p \times D_f \times I_g$$

Maka:

$$I_G = C_p \times D_f \times S_f \times I_f \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana:

I_G = Arus *grid* maksimum (A)

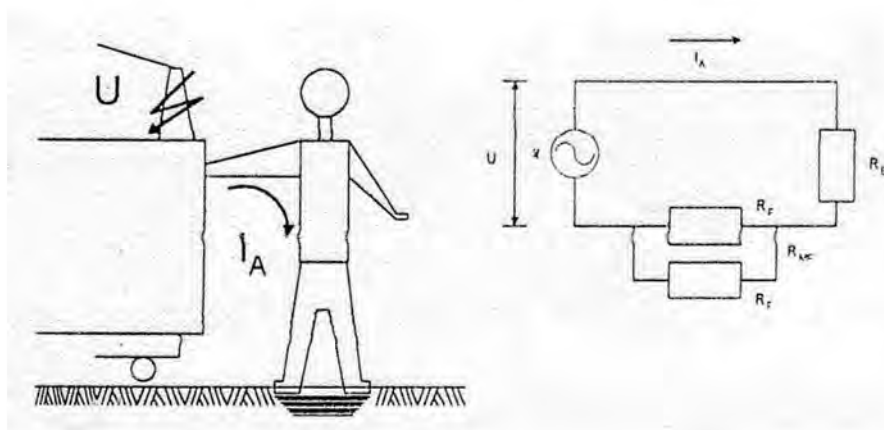
D_f = Faktor *decrement*, nilainya ditentukan berdasarkan waktu gangguan = 1

C_p = Faktor koreksi, dihitung untuk kenaikan relatif arus gangguan selama keberlangsungan sistem dengan pertumbuhan nol $C_p = 1$.

S_f = Faktor arus = 0,7 (untuk gardu induk yang berkawat tanah).

2.8.3 Tegangan Sentuh Yang Diizinkan

Sesuai dengan *IEEE Guide For Safety in AC Substation Grounding Standard* 80 tahun 1986, besarnya nilai tegangan sentuh untuk lapisan tanah yang homogen (*uniform*) dapat ditunjukkan seperti persamaan-persamaan di bawah dan arus gangguan yang dibatasi oleh tahanan tubuh manusia dan tahanan kontak ke tanah dari kaki orang seperti terlihat pada gambar di bawah:



Gambar 2.9 Tegangan Sentuh dengan Rangkaian Penggantinya

Tahanan kontak antara tanah dengan kedua kaki dalam paralel:

$$R_{2Kp} = 0,5 (R_{kaki} + R_{M kaki}) \dots\dots\dots (2.20)$$

Karena jarak R_m kaki sekitar 1 meter maka dapat diabaikan, sehingga:

$$R_{2Kp} = 0,5 R_{kaki}$$

Dimana R untuk plat bundar dengan jari-jari b :

$$R = \frac{\rho s}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

Dimana $A = \pi b^2$, sehingga R menjadi:

$$R = \frac{\rho_s}{4} \sqrt{\frac{\pi}{\pi b^2}} = \frac{\rho_s}{4 b}$$

$$b = 0,08 \text{ m}$$

sehingga $R = 3 \rho_s$

sehingga persamaan 2.20 berubah menjadi:

$$R_{2Kp} = 1,5 \rho_s \dots\dots\dots (2.21)$$

Tahanan ekivalen dari tegangan sentuh:

$$R_A = R_B + 0,5 (R_{kaki}) \dots\dots\dots (2.22)$$

Maka tegangan sentuh:

$$E_{touch} = (R_B + R_{2Kp}) I_k \dots\dots\dots (2.23)$$

Dengan memperhitungkan harga nominal dari tahanan jenis permukaan tanah, persamaan (2.20) perlu dikoreksi oleh faktor pengurangan C_s dimana C_s merupakan fungsi dari (h_s, K) , sehingga hasilnya berubah menjadi:

$$R_{2Kp} = 1,5 C_s (h_s, K) \rho_s \dots\dots\dots (2.24)$$

Dari persamaan (2.11), (2.12), (2.21), (2.23) diperoleh:

$$E_{touch50} = \{1000 + 1,5 C_s (h_s, K) \rho_s\} \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$E_{touch70} = \{1000 + 1,5 C_s (h_s, K) \rho_s\} \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana:

$$R_B = \text{Tahanan tubuh manusia (1000 ohm)}$$

I_A = Arus gangguan (A)

$$I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{untuk berat rata-rata 50 Kg manusia}$$

$$= \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{untuk berat rata-rata 70 Kg manusia}$$

E_{touch} = Tegangan sentuh yang diijinkan

ρ = Tahanan jenis tanah

C_s = Faktor reduksi untuk menentukan nilai nominal tahanan jenis-lapisan permukaan

t_s = lama arus mengalir melalui tubuh manusia (detik)

$$K = \rho - \rho_s / \rho + \rho_s$$

h = Ketebalan lapisan batu koral (cm)

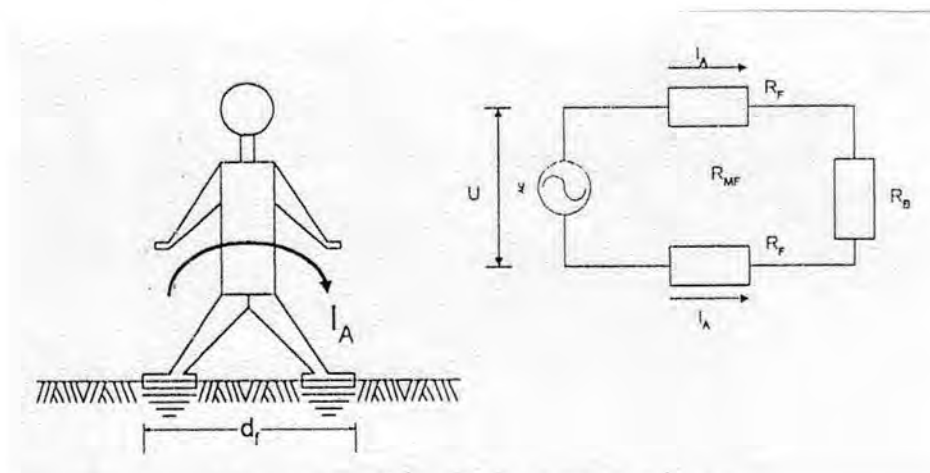
Dalam tabel 2.4 diberikan besar tegangan sentuh yang diizinkan dan lama gangguan.

Tabel 2.4 Tegangan sentuh yang diizinkan dan lama gangguan

Lama gangguan t (detik)	Tegangan sentuh yang diizinkan (V)
0,1	1.980
0,2	1.400
0,3	1.140
0,4	990
0,5	890
1	626
2	443
3	362

2.8.4 Tegangan Langkah Yang Diizinkan

Sesuai dengan *IEEE Guide For Safety In AC Substation Grounding Standard* 80 tahun 1986, besarnya tegangan langkah untuk tanah yang homogen (*uniform*) ditunjukkan seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.10 Rangkaian Tegangan Langkah

$$R_{\text{kaki}} = \frac{\rho}{4b} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$R_{M \text{ kaki}} = \frac{\rho}{2 \pi d_{\text{kaki}}} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana:

R_{kaki} = Tahanan satu kaki terhadap tanah (ohm)

$R_{M \text{ kaki}}$ = Tahanan mutual kedua kaki (ohm)

b = diameter kaki (0,08 m)

d_{kaki} = jarak kaki (1m)

Tahanan kontak tanah dengan kedua kaki yang seri adalah:

$$R_{2KS} = 2 (R_{kaki} + R_{M kaki}) \dots\dots\dots (2.29)$$

Maka untuk rangkaian tegangan langkah adalah:

$$R_A = R_B + 2 (R_{kaki} + R_{M kaki}) \dots\dots\dots (2.30)$$

Tegangan langkah yang diizinkan :

$$E_{step} = (R_B + R_{2KS}) I_K \dots\dots\dots (2.31)$$

Dengan memperhitungkan harga nominal dari tahanan jenis permukaan tanah digunakan faktor pengurangan C_s , dimana C_s merupakan fungsi (h_s, K) :

$$C_s = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nhs}{0,08} \right)^2}} \right] \dots\dots\dots (2.32)$$

Maka persamaan (2.29) dapat diubah menjadi :

$$R_{2KS} = 6,0 C_s (h_s, K) \rho_s \dots\dots\dots (2.33)$$

Dari persamaan (2.11), (2.12), (2.30), (2.31), (2.32) diperoleh :

$$E_{step50} = \{ 1000 + 6 C_s (h_s, K) \rho_s \} \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots (2.34)$$

$$E_{step70} = \{ 1000 + 6 C_s (h_s, K) \rho_s \} \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots (2.35)$$

Dimana:

R_B = Tahanan tubuh manusia (1000 ohm)

I_A = Arus gangguan (A)

I_K = $\frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$ Untuk berat rata-rata 50 kg manusia

$$= \frac{0,157}{1000} \text{ Untuk berat rata-rata 70 kg manusia}$$

E_{step} = Tegangan langkah yang diizinkan

R_{sh} = Resistansi jettis batu koral (3000 ohm)

C_s = Faktor reduksi untuk menentukan nilai nominal tahanan jenis lapisan permukaan

t_s = Lama arus mengalir melalui tubuh manusia.

Dalam tabel 2.5 diberikan besar tegangan langkah yang diizinkan dan lama gangguan.

Tabel 2.5 Tegangan langkah yang diizinkan dan lama gangguan

Lama gangguan t (detik)	Tegangan langkah yang diizinkan (V)
0,1	7.000
0,2	4.950
0,3	4.040
0,4	3.500
0,5	3.140
1	2.216
2	1.560
3	1.280

2.8.5 Tegangan Sentuh Yang Sebenarnya (Tegangan *Mesh*)

Tegangan *Mesh* merupakan salah satu bentuk tegangan sentuh. Tegangan *Mesh* ini didefinisikan sebagai tegangan peralatan yang ditanahkan 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 pembumian gardu induk, dan inilah yang diambil sebagai tegangan untuk desain yang aman.

Tegangan *Mesh* sebagai pendekatan sama dengan $\rho \cdot I_G$, dimana ρ tahanan jenis tanah merupakan dalam ohm.meter dan I_G arus yang melalui konduktor *grid*. Tetapi tahanan jenis tanah nyatanya tidak merata, demikian juga arus I_G tidak sama pada semua konduktor *grid*. Oleh karena itu untuk mencakup pengaruh-pengaruh jumlah konduktor paralel n , jarak-jarak konduktor paralel D , diameter konduktor d , dan kedalaman penanaman h , Tegangan *Mesh* dapat dihitung melalui persamaan di bawah ini:

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L} \dots\dots\dots (2.36)$$

Dimana:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dh} + \frac{h}{4d} \right) + \frac{k_i}{k_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \dots\dots\dots (2.37)$$

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

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

$$h_0 = 1 \text{ meter.}$$

$$k_i = 0.656 + 0.172 n$$

$$D = \text{Jarak antar konduktor paralel (m)}$$

h = Kedalaman penanaman konduktor (m)

n = Jumlah konduktor ($n = \sqrt{n_a \cdot n_b}$)

d = diameter konduktor (mm^2)

2.8.6 Tegangan Langkah Yang Sebenarnya

Tegangan langkah sebenarnya adalah perbedaan tegangan yang terdapat diantara kedua kaki bila manusia berjalan di atas tanah sistem pembumian pada keadaan terjadi gangguan. Tegangan langkah maksimum sebenarnya dapat dihitung dengan persamaan:

$$E_s = \frac{\rho_s k_s k_i I_G}{L} \dots\dots\dots (2.38)$$

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \dots\dots\dots (2.39)$$

$$k_i = 0.656 + 0.172 n$$

BAB III

METODOLOGI PEMBAHASAN DAN PENYELESAIAN

3.1 Lokasi Pengambilan Data

Dalam penulisan karya ilmiah ini penulis melakukan pengambilan data di PT. PLN (Persero) Penyaluran Dan Pusat Pengatur Beban Sumatera Unit Transmisi Medan (Utragi Sei Rotan), yang beralamat di jln. Listrik no.12 Medan.

3.2 Variabel Pengamatan

Adapun variabel yang penulis amati dalam penulisan karya ilmiah ini adalah sistem pembumian *Grid switchyard*. Dimana pembumian *Grid* bertujuan untuk memperkecil tahanan pembumian dan untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang tidak dialiri arus dan bagian-bagian ini dengan tanah sampai dengan harga yang aman untuk semua kondisi operasi normal.

3.3 Data Pengamatan

Berdasarkan pengamatan yang penulis lakukan maka didapat data-data Sistem Pembumian *Grid Switchyard* sebagai berikut:

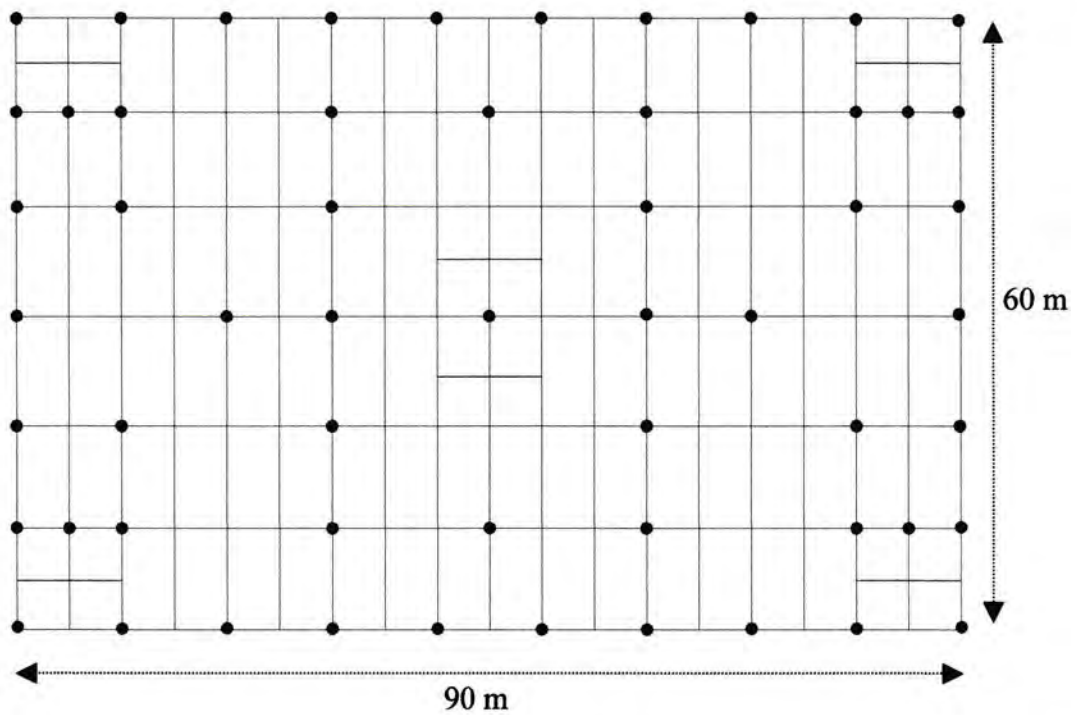
- Luas area pembumian grid : 5400 m².
- *Type Conductor grid* : *Standard Cooper Wire*
- Dimensi *grid* (a x b) : 90 m x 60 m
- Jarak *grid* pada sisi a : 5 m.

- Jarak *grid* pada sisi b : 10 m.
- Jumlah hantaran pada sisi a : 19
- Jumlah hantaran pada sisi b : 7
- Kedalaman penanaman *grid* : 0,8 m.
- Penampang konduktor *grid* : 120 mm².
- Diameter konduktor *grid* : 0,0012 m.
- Jumlah Rod : 57
- Panjang konduktor Rod : 3,5 m
- Penampang konduktor Rod : 120 mm²
- Penampang konduktor peralatan ke *grid* : 120 mm².
- Ketebalan batu koral : 0,1 m.
- Tahanan jenis tanah (ρ) : 100 Ω .m
- Resistivitas permukaan batu koral (ρ_s) : 3000 Ω

Tabel data hasil pengukuran tahanan pembumian *grid* pada *switchyard*/gardu induk Sei Rotan adalah:

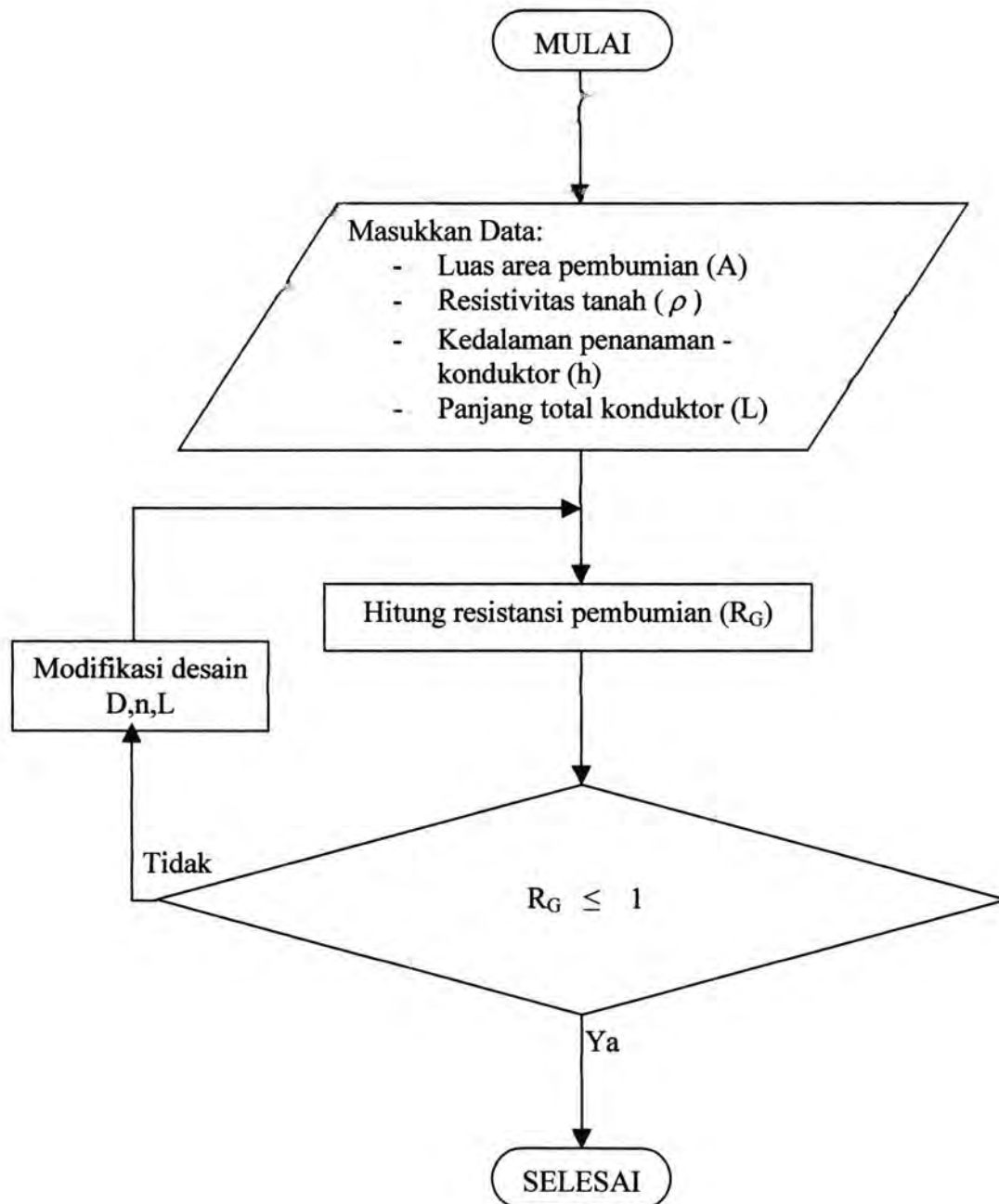
Tabel 3.1 Data Pengukuran Tahanan Pembumian *Grid*

Piranti Peralatan	LA	PT	PMS	CT	PMT
I	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1
II	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
III	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2



Gambar 3.1 Denah Pembumian *Grid Switchyard* Tragi Sei Rotan.

3.4 Flow Chart Pembahasan



BAB IV

BAB IV

HASIL PEMBAHASAN SISTEM PEMBUMIAN *GRID SWITCHYARD* PADA GARDU INDUK

4.1 Umum

Maksud sistem pembumian dalam *switchyard* pada gardu induk adalah mengusahakan agar permukaan dalam Gardu Induk (dan sekitarnya) mempunyai tegangan mendekati *uniform*, dan nilainya mendekati nol, dengan menghubungkan semua bagian yang dalam keadaan normal tidak bertegangan dengan tanah. Dengan demikian maka operator / petugas-petugas di Gardu Induk selalu berada dekat pada tegangan tanah dapat bekerja dengan aman.

Salah satu kunci dari parameter-parameter dari sistem pembumian adalah keakuratan dalam perhitungan tahanan pembumian. Mula-mula selalu diusahakan agar nilai tahanan pembumian sekecil mungkin agar drop tegangan akibat hubung singkat menjadi kecil. Namun demikian pada arus hubung singkat yang besar, sering sulit untuk memperoleh *drop* tegangan yang kecil, meskipun tahanan pembumiannya kecil. Oleh karena itu yang diusahakan adalah agar gradien tegangan di Gardu Induk dalam keadaan gangguan hubung singkat adalah sekecil mungkin sehingga tetap aman bagi petugas di Gardu Induk. Oleh karena itu maka pembumian *switchyard* berbentuk *grid* yang terdiri dari beberapa batang kawat sejajar yang saling dihubungkan. Semua bagian konduktif dalam keadaan normal tidak bertegangan dihubungkan pada sistem jaringan ini, termasuk titik netral sistem.

Sistem pembumian dengan menggunakan metode *grid* pada Gardu Induk / *switchyard* dalam kondisi terjadi gangguan ataupun dalam keadaan normal ada dua hal utama, yaitu:

- Untuk mencegah arus gangguan, dengan menyalurkan arus gangguan ke tanah tanpa melebihi batas yang diizinkan terutama untuk operator dan peralatan.
- Untuk menjamin manusia disekitar fasilitas pembumian terlindungi dari bahaya kejutan listrik.

Sistem pembumian dilakukan dengan menganalisa parameter-parameter yang sangat menentukan sehingga pembumian yang direncanakan benar-benar sudah aman.

4.2 Prosedur Perhitungan Resistansi Sistem Pembumian *Grid Switchyard* Pada Gardu Induk

Dalam menentukan parameter resistansi sistem pembumian *grid* ini dilakukan dengan menggunakan prosedur sebagai berikut:

- Memasukkan data-data sistem pembumian *grid switchyard* diantaranya luas area pembumian (A), resistivitas tanah (ρ), kedalaman penanaman konduktor (h), dan panjang total konduktor (L).
- Menghitung resistansi pembumian *grid* (R_G).
- Membandingkan harga resistansi pembumian *grid* pada *switchyard*.

4.3 Hasil Analisa Perhitungan Resistansi Sistem Pembumian *Grid Switchyard*

Pada Gardu Induk

Berdasarkan data-data yang telah didapat pada pengamatan dalam karya ilmiah ini, maka hasil resistansi sistem pembumian *grid switchyard* adalah sebagai berikut:

- Panjang konduktor kisi-kisi utama : $19 \times 60 = 1140$
 - Panjang konduktor kisi-kisi melintang : $7 \times 90 = 630$
 - Panjang konduktor Rod : $3,5 \times 57 = 199,5$ +
-
- 1969,5 meter

Total panjang konduktor (L) keseluruhan adalah 1969,5 meter.

Maka resistansi pembumian *grid* sesuai dengan persamaan (2.17) adalah sebagai berikut:

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

$$R_G = 100 \left[\left(\frac{1}{1969,5} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 5400}} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + 0,8 \sqrt{\frac{20}{5400}}} \right) \right]$$

$$R_G = 100 [(0,0005 + 0,003) \cdot (1 + 0,953)]$$

$$R_G = 100 \times 0,006$$

$$R_G = 0,6 \, \Omega$$

Menurut hasil perhitungan yang diperoleh diatas bahwa resistansi *grid* (R_G) adalah 0,6 ohm. Sedangkan hasil pengukuran resistansi *grid* yang diperoleh dilapangan adalah 0,2 ohm. Disini terjadi perbedaan harga resistansi *grid* antara $R_{G\text{perhitungan}}$ dengan $R_{G\text{pengukuran}}$ yang tidak begitu besar yaitu 0,4 ohm. Ini disebabkan oleh beberapa faktor kesalahan dalam penelitian, yaitu karena perhitungan secara teori dalam memasukkan parameter-parameter pembumian seperti angka desimal di belakang koma yang dibatasi, serta pembacaan alat ukur yang digunakan dipengaruhi oleh kondisi baterai yang lemah dari alat ukur tersebut, dan dalam pengukuran resistansi yang hanya diambil nilai rata-ratanya saja.

Dari kriteria yang diizinkan menurut *IEEE/ANSI standard 80 – 1986* adalah:

$$R_G \leq 1$$

Maka resistansi *grid* dari sistem pembumian *switchyard* di atas sudah memenuhi persyaratan yang diizinkan dan hasil perbandingan serta analisa harga resistansi *grid* menimbulkan perbedaan yang jauh.

BAB V

KESIMPULAN

Dari hasil analisa perhitungan dalam penulisan karya ilmiah ini, maka penulis menarik beberapa kesimpulan diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Sistem pbumian dengan metode *grid* dapat meningkatkan efektivitas kerja untuk meratakan tegangan dipermukaan tanah.
2. Dengan menggunakan sistem pbumian *grid*, tegangan kejut yang timbul akibat gangguan tanah dapat dibatasi.
3. Sistem pbumian *grid* sangat efektif untuk menghasilkan resistansi pbumian yang relatif rendah.
4. Pada hasil perhitungan resistansi pbumian *grid* menghasilkan harga resistansi sebesar 0,6 ohm, sedangkan harga rata-rata resistansi hasil pengukuran yang dilakukan dilapangan sebesar 0,2 ohm. Disini terjadi perbedaan harga resistansi yang besar yaitu 0,4 ohm,hal ini terjadi disebabkan oleh beberapa faktor kesalahan dalam penelitian,yaitu karena perhitungan secara teori dalam memasukkan paramerer-parameter pbumian seperti angka desimal di belakang koma yang dibatasi,serta pembacaan alat ukur yang digunakan dipengaruhi oleh kondisi baterai yang lemah dari alat ukur tersebut,dan dalam pengukuran resistansi yang hanya diambil nilai rata-ratanya saja.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) HUTAURUK, TS, ***“Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan”***, Hutaauruk Erlangga, Jakarta 1991.
- 2) Peraturan Umum Instalasi Listrik 1987.
- 3) MUHAMMAD HADDIN, TUMIRAN, T.HARYONO, ***“Pengaruh Perubahan Konduktor Paralel Terhadap Tegangan Sentuh Pada Pentanahan Rectangular Grid Rod Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500 Kv”***, Taken From: ***“Proceedings Seminar Sistem Tenaga Listrik III”***, Institut Teknologi 10 November, Surabaya, Oktober 8th 2002.
- 4) IEEE, ***“Guide For Safety In Substation Grounding”***, ANSI/IEEE Standard 80-1986.
- 5) SVERAKS, J.G, 1981, ***“Simplified Analysis Of Electrical Gradient Above A Ground Grid : Part I, How Good Is The Present IEEE Methode”***, IEEE Transaction Power Apparatus And Systems, (95)1, Jan, 7-25.
- 6) Dr.ARTONO ARISMUNANDAR, ***“Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, Jilid III, Gardu Induk”***, Pradnya Paramita, Jakarta 1997.