

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sistem Pentanahan adalah suatu sistem yang menghubungkan antara sistem kelistrikan, peralatan, dan instalasi listrik dengan tanah. Hal tersebut bertujuan untuk mengamankan seluruh komponen sistem kelistrikan dari arus gangguan dan manusia dari sengatan listrik. Dalam penulisan tugas akhir ini mengenai analisa nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah pada gardu induk 150 KV Kentungan mengacu pada beberapa referensi yang berhubungan dengan topik pembahasan pada tugas akhir ini.

Jurnal penelitian yang di lakukan oleh Agus Pranoto, Hans Tumaliang, dan Glanny M.Ch. Mangindaan (2018) yang berjudul “ Analisis Sistem Pentanahan Gardu Induk Teling dengan Konstruksi Grid (Kisi-Kisi) “. Penelitian ini menganalisa sistem pentanahan pada gardu induk teling dengan menggunakan konstruksi pentanahan berbentuk grid dimana metode yang di gunakan untuk mendapatkan nilai pentanahan yaitu perhitungan pentanahan grid tanpa batang pentanahan dan dengan batang pentanahan. Di dapatkan nilai pentanahan yang di dapatkan sebesar $0,1 \Omega$ sampai $0,8 \Omega$ lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan tanpa batang pentanahan sebesar $R_g = 0,47 \Omega$ dan dengan batang pentanahan sebesar $R_g = 0,18 \Omega$.

Jurnal penelitian yang di lakukan oleh Yusmartato (2018) yang berjudul “ Pemasangan Sistem Pembumian Kisi-Kisi Pada Peralatan Gardu Induk 150 KV di Kecamatan Pangururan “. Penelitian ini membahas perancangan sistem pentanahan di gardu induk pangururan dengan menggunakan desain pentanahan berbentuk grid dan memasang 28 titik pembumian dengan menggunakan elektroda batang (rod).

Jurnal penelitian yang dilakukan oleh Gery Baldi dan Harun Al Rasyid (2014) yang berjudul “ Penilaian Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah di Gardu Induk Konvensional dan Berisolasi Gas “. Penelitian ini membandingkan nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah pada gardu induk

gambir lama sebagai gardu induk konvensional dan gardu induk senayan baru gardu induk berisolasi gas (GIS). Di dapatkan sebuah hasil bahwa nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah pada gardu induk senayan baru nilainya lebih besar di bandingkan dengan gardu induk gambir lama hal ini di karenakan nilai tahanan jenis permukaan tanahnya yang lebih besar.

Jurnal penelitian yang di lakukan oleh Yoga Septria (2015) yang berjudul “ Evaluasi Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah Gardu Induk (GI) 150 KV Kota Baru Akibat Perubahan Resistivitas Tanah “. Hasil dari penelitian ini bahwa perubahan nilai resistivitas pada tanah dalam kondisi hujan atau basah dengan nilai 98,3 Ω .m lebih kecil di bandingkan dengan kondisi panas atau kering dengan nilai 110,08 Ω .m.

Jurnal penelitian yang di lakukan oleh Haris Isyanto dan Nurchosid (2014) yang berjudul “ Disain Optimalisasi Jarak Grid dan Ground Rod Pada Sistem Pembumian “. Penelitian ini membahas mengenai disain optimal jarak grid dan ground rod dengan menggunakan sistem gui pada matlab 2011a pada switchyard 500 KV PLTU Adipala. Dengan jarak grid 23 m dan ground rod 6 m memberikan disain dari sistem pembumian yang optimal dengan resistansi pembumian sebesar $R_g = 0,13806 \Omega$ lebih kecil dari batas maksimum resistansi pembumian sebesar 0,5 Ω (IEC 60694).

Jurnal penelitian yang di lakukan oleh Abdul latif, Wayan Gede Ariastina, dan I Nyoman Setiawan (2016) yang berjudul “ Probabilitas Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah di Lokasi Rencana Gardu Induk 500 KV Antosari “. Berdasarkan hasil dari penelitian yang di lakukan bahwa semakin luas sistem pentanahan grid dan semakin dangkal penanaman dari batang rod maka nilai tegangan sentuhnya semakin rendah. Dalam kondisi tanah basah nilainya 73 volt dan tanah kering nilainya 165 volt dengan nilai probabilitas sebesar 0,72 %. Semakin luas sistem pentanahan grid dan semakin dangkal penanaman dari batang rod maka nilai tegangan langkahnya semakin kecil. Dalam kondisi tanah basah nilainya 125 volt dan dalam kondisi tanah kering nilainya 281 volt dengan nilai probabilitas sebesar 0,72%.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Pentanahan

Sistem Pentanahan adalah suatu sistem yang menghubungkan sistem kelistrikan, peralatan, dan instalasi dengan tanah. Hal ini bertujuan untuk mengamankan manusia dari sengatan listrik dan mengamankan komponen sistem kelistrikan dari arus gangguan. Berdasarkan standard aman (PUIL 2000) di harapkan nilai resistansi dari sistem pentanahan di buat serendah atau sekecil mungkin.

Tujuan dari sistem pentanahan pada suatu sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut:

1. Mencegah timbulnya busur tanah yang diakibatkan dari arus gangguan yang besarnya ($>5A$)
2. Memberikan perlindungan terhadap bahaya listrik bagi pemanfaatan listrik dan lingkungan.
3. Memproteksi seluruh peralatan-peralatan sistem kelistrikan.
4. Mendapatkan nilai keandalan sistem yang baik dari segi kualitas maupun kontinuitas penyaluran tenaga listrik.
5. Membatasi kenaikan tegangan fasa yang tidak terganggu (Sehat)

Sistem pentanahan atau grounding merupakan suatu faktor yang sangat penting bagi sistem tenaga listrik. Agar Sistem pentanahan dapat bekerja dengan baik, maka harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut:

1. Membuat jalur impedansi yang rendah ke tanah dengan tujuan sebagai pengaman terhadap manusia dan semua peralatan.
2. Menggunakan bahan yang tidak mudah korosi terhadap seluruh zat kimiawi yang ada di dalam tanah.
3. Mampu mengatasi arus gangguan secara berulang yang di akibatkan kegagalan isolasi.

4. Menggunakan sistem mekanik yang kuat dan mudah ketika dalam masa perawatan ataupun perbaikan

Berdasarkan Djiteng Marsudi (2005) dalam sebuah instalasi listrik ada empat bagian yang harus ditanahkan adalah sebagai berikut:

1. Semua bagian instalasi yang dapat menghantarkan listrik dan dengan mudah di sentuh oleh manusia. Hal ini perlu sekali agar potensial dari penghantar yang mudah di sentuh oleh manusia nilainya sama dengan potensial tanah sehingga apabila manusia menyentuhnya aman dan tidak terkena aliran listrik.
2. Bagian pembuangan muatan listrik (bagian bawah) dari lightning arrester. Hal ini di perlukan agar lightning arrester dapat berfungsi dengan baik dengan membuang muatan listrik yang berasal dari petir menuju ke tanah.
3. Kawat petir pada saluran transmisi hal ini di perlukan sama membuang muatan yang berasal dari petir dengan mentanahkan semua bagian kaki tiang dari saluran transmisi agar ketika petir menyambar kawat petir dapat di salurkan melalui kaki tiang saluran transmisi.
4. Titik netral dari transformator atau titik netral generator hal ini diperlukan untuk memproteksi gangguan hubung tanah.

2.2.2 Elektroda Sistem Pentanahan

Elektroda pentanahan yaitu suatu penghantar/konduktor yang di masukkan ke dalam tanah dan kontak secara langsung dengan tanah hal ini bertujuan untuk mengalirkan arus gangguan dan arus bocor ke dalam tanah sehingga tidak terjadi perbedaan tegangan pada permukaan tanah apabila terjadi gangguan.

Berdasarkan Tadjudin (1998) menyatakan bahwa konduktor yang di gunakan sebagai elektroda harus memenuhi beberapa syarat yaitu:

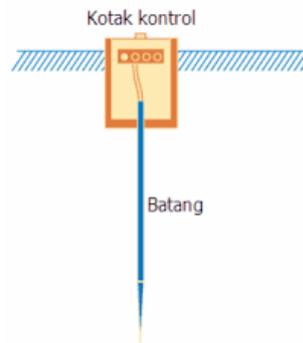
1. Memiliki daya hantar yang cukup besar sehingga tidak akan memperbesar beda potensial yang berbahaya
2. Memiliki kekuatan mekanis pada tingkat yang tinggi terutama bila digunakan pada daerah yang tidak terlindungi terhadap kerusakan fisik.
3. Tahan terhadap peleburan dari keburukan sambungan listrik, walaupun konduktor tersebut akan terkena magnitudo arus gangguan dalam waktu lama.
4. Tahan terhadap korosi

2.2.2.1 Bentuk elektroda

Pada dasarnya bentuk elektroda pentanahan yang akan dipasang di pilih berdasarkan tempat dimana sistem pentanahan tersebut akan di pasang. Hal ini di karenakan agar mendapatkan hubungan kontak yang baik terhadap tanah. Berikut ini merupakan bentuk-bentuk elektroda pentanahan:

1. Elektroda Batang

Elektro batang yaitu elektroda yang berbentuk pipa ataupun besi yang dipasang ke dalam tanah. Jenis elektroda batang ini sering sekali di gunakan pada gardu induk karena tidak memerlukan lahan yang cukup luas untuk memasangnya dan dalam pemasangan elektroda ini perlu di tanam dengan kedalaman tanah yang cukup dalam. Jenis elektroda batang ini merupakan jenis elektroda pertama yang di gunakan dalam Sistem pentanahan dan teori-teori yang di kembangkan dari elektroda jenis lain mengacu pada teori elektroda batang ini. Berikut ini gambar dari elektroda jenis batang pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Elektroda Batang

Berikut ini merupakan rumus yang di gunakan untuk menentukan nilai tahanan dari elektroda batang:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{A} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana : R = Tahanan Pentanahan (Ohm)

ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-meter)

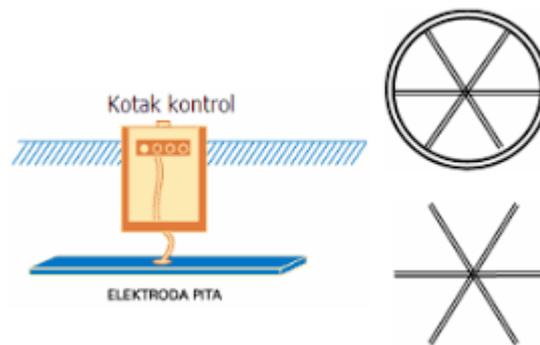
L = Panjang Elektroda (Meter)

A = Diameter Elektroda (Meter)

2. Elektroda Pita (Kisi-Kisi)

Elektroda pita (Kisi-Kisi) adalah elektroda pentanahan yang berbentuk pita atau hantaran yang di pilin dengan penampang berbentuk bulat. Pemasang elektroda pita ini di tanam secara vertical dengan menanam batang penghantar secara horizontal dan di tanam dangkal. Bentuk elektroda pita ini di tanam untuk kondisi tanah berbatu keras dan memiliki nilai resistansi tanah yang tinggi.

Besar dan kecilnya nilai resistansi dari elektroda pita ini di tentukan berdasarkan bentuk konfigurasi dari elektroda pita ini yakni berbentuk melingkar roda ataupun kombinasi antara keduanya. Berikut ini gambaran bentuk dari elektroda pita seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Elektroda Pita

Berikut ini merupakan rumus yang digunakan untuk menentukan nilai tahanan untuk elektroda pita:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left[\ln \left(\frac{2W}{\sqrt{D \cdot Z}} \right) + \frac{1,4L}{\sqrt{A}} - 5,6 \right] \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana : R = Tahanan Kawat (Ohm)

ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-Meter)

L = Panjang Total Grid Kawat (Meter)

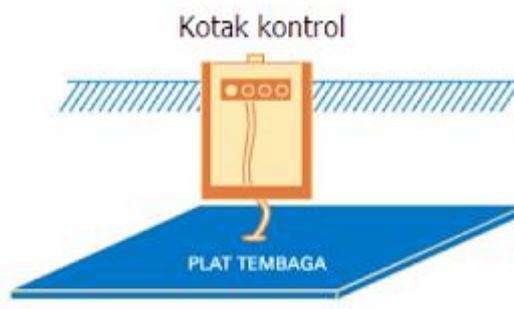
D = Diameter Kawat (Meter)

W = Luasan yang di Jangkau Grid (m²)

Z = Kedalaman Penanaman (m)

3. Elektroda Plat

Elektroda Plat adalah elektroda yang berbahan dasar dari plat logam yang bersifat konduktif baik dalam kondisi berlubang maupun bisa juga kawat kasa. Elektroda plat ini sangat cocok digunakan untuk mendapatkan nilai resistansi pentanahan yang kecil yang sulit di dapatkan oleh elektroda lainnya. Elektroda jenis plat ini pada umumnya tertanam cukup dalam di tanah. Berikut ini merupakan gambaran dari elektroda jenis plat seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Elektroda Plat

Berikut ini merupakan rumus yang digunakan untuk mendapatkan nilai tahanan dari elektroda plat:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8W}{0,5W+T} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana : R = Tahanan Pentanahan (Ohm)

ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-Meter)

L = Panjang Plat (Meter)

W = Lebar Plat (Meter)

T = Tebal Plat (Meter)

2.2.2.2 Susunan Elektroda

Menurut Anggoro (2006) bahwa susunan elektroda sistem pentanahan yang dibangun sangat mempengaruhi terhadap nilai resistansi pentanahan. Berikut ini jenis-jenis susunan elektroda sistem pentanahan:

1. Susunan Elektroda secara vertical dengan satu batang atau lebih yang disambungkan paralel.
2. Susunan Elektroda secara horizontal dengan 1 batang (rod;strip) atau lebih yang ditanam paralel atau berbentuk bintang.
3. Susunan elektroda secara grid dengan 1 kotak (mesh) atau lebih yang ditanam berbentuk bujur sangkar atau empat persegi panjang.
4. Susunan elektroda secara gabungan grid atau vertical dimana setiap sudut kotak (mesh) ditambah 1 batang vertical dengan Panjang tertentu.

Untuk kondisi struktur tanah yang tidak terlalu keras penggunaan susunan elektroda secara vertical sangat dianjurkan karena dengan kondisi tanah yang demikian sehingga memungkinkan untuk menanam elektroda lebih dalam ke dalam tanah dan dapat memperkecil nilai resistansi dari pentanahannya. Untuk kondisi struktur tanah yang keras dan berbatu lebih praktis untuk menggunakan susunan elektroda secara horizontal karena tidak perlu melakukan penanaman yang terlalu dalam tetapi banyak membutuhkan banyak batang pentanahan secara ekonomis kondisi yang demikian tidaklah ekonomis.

2.2.3 Karakteristik dan Tahanan Jenis Tanah

Karakteristik tanah ini merupakan suatu hal yang sangat penting karena berkaitan erat terhadap perencanaan sistem pentanahan yang akan digunakan. Berdasarkan Hutahuruk (1991) bahwa nilai tahanan jenis tanah (ρ) bermacam-macam tergantung dari komposisi tanah bahkan jarang sekali di temukan nilai tahanan jenis tanah yang sama ataupun seragam tergantung dari sifat geologi tanah tersebut.

Tahanan jenis tanah ini lama kelamaan akan mengecil nilainya seiring dengan meningkatnya jumlah larutan elektrolit dalam tanah. Tahanan jenis tanah juga akan berubah-ubah seiring dengan perubahan suhu dan kelembaban. Perbedaan nilai tahanan jenis tanah akibat iklim biasanya hanya terbatas sampai kedalaman beberapa meter dari permukaan tanah, dan nilai konstanta akan di dapatkan pada bagian tanah yang terdalam. Nilai Tahanan jenis tanah akan meningkat apabila kondisi tanah yang kering dan terdapat sedikit unsur kandungan mineral dan garam-garam yang dapat larut di dalamnya.

Berdasarkan IEEE Std. 141-1991 menganjurkan untuk mengukur tahanan jenis tanah yang akan di pasang sistem pentanahan. Karena pada kedalaman tertentu dari permukaan tanah di pengaruhi oleh larutan unsur kimia, kelembaban, dan suhu. Berikut merupakan nilai tahanan jenis tanah dari berbagai macam jenis tanah dan nilai tahanan pentanahan berdasarkan tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tahanan Jenis Berbagai Macam Tanah dan Nilai Tahanan Pentanahan

Macam Tanah	Tahanan Jenis (ohm-m)	Tahanan Pentanahan ()					
		Kedalaman Batang Pentanahan (m)			Panjang Pita Pentanahan (m)		
		3	6	10	5	10	20
Humus Lembab	30	10	5	3	12	6	3
Tanah Pertanian, Tanah liat	100	33	17	10	40	20	10
Tanah Liat Berpasir	150	50	25	15	60	30	15
Pasir Lembab	300	66	33	20	80	40	20
Pasir Kering	1.000	330	165	100	400	200	100
Beton 1:5	400	-	-	-	160	80	40
Kerikil Lembab	500	160	80	48	200	100	50
Kerikil Kering	1.000	330	165	100	400	200	100
Tanah Berbatu	30.000	1.000	500	300	1200	600	300
Batu Karang	10^7	-	-	-	-	-	-

Perubahan nilai uap lembab pada tanah akan berpengaruh terhadap nilai resistivitas tanah seperti pada tabel 2.2. Demikian juga dengan temperatur tanah, bila mencapai suhu beku di dalam tanah akan berpengaruh juga terhadap resistivitas tanah seperti pada tabel 2.3.

Tabel 2.2 Pengaruh Kelembaban Tanah Terhadap Resistivitas Tanah

Kandungan Kelembaban Dalam Berat (%)	Tahanan Jenis Tanah (ohm-cm)	
	Tanah Paling Atas	Tanah Liat Berpasir
0	>100	>100
6	135.000	38.000
8	90.000	28.000
10	60.000	22.000
12	35.000	17.000
14	25.000	14.000
16	20.000	12.000
18	15.000	10.000
20	12.000	9000
22	10.000	8000
24	10.000	7000

Tabel 2.3 Pengaruh Suhu Terhadap Resistivitas Tanah

Suhu (°c)	Resistivitas Tanah (ρ) (ohm-cm)
-5	70.000
0	30.000
0	10.000
10	8000
20	7000
30	6000
40	5000
50	4000

2.2.4 Gardu Induk

Gardu induk dapat di definisikan sebagai suatu stasiun pengumpul tenaga listrik yang berasal dari sistem pembangkitan ataupun sistem transmisi. Gardu induk ini merupakan sub sistem dari sistem transmisi sedangkan sistem transmisi merupakan sub sistem dari sistem tenaga listrik, yang artinya bahwa gardu induk ini merupakan sub-sub sistem dari sistem tenaga listrik. Gardu induk dalam pengoperasiannya tidak bisa di pisahkan dari sistem transmisi hal ini di karenakan gardu induk berperan untuk mengatur daya yang menuju ke gardu induk lainnya ataupun menaikkan dan menurunkan tegangan. Adapun fungsi dari gardu induk adalah sebagai berikut:

1. Mentransformasikan tenaga listrik.
2. Sebagai pengukuran, pengawasan operasi, dan sebagai proteksi terhadap sistem tenaga listrik.
3. Sebagai sarana telekomunikasi untuk internal PLN yang sering dikenal dengan sistem SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).
4. Pengaturan daya ke gardu induk lainnya melalui tegangan tinggi dan ke gardu induk distribusi yang telah di turunkan tegangannya melalui feeder-feeder tegangan menengah pada gardu induk.

Jenis-jenis gardu induk bisa di bedakan menjadi beberapa bagian yaitu:

A. Gardu Induk Berdasarkan Tegangannya, sebagai berikut:

1. Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 275 KV dan 500 KV.
2. Gardu Induk Tegangan Tinggi (GITT) 150 KV dan 70 KV.

B. Gardu Induk Berdasarkan Pemasangan Peralatan sebagai berikut:

1. Gardu Induk Pasang Luar

Gardu induk pasang luar ini merupakan gardu induk yang sebagian komponennya di letakan di luar area gedung gardu induk, kecuali komponen sistem kontrol, sistem proteksi dan sistem kendali di letakan di dalam gedung. Gardu induk pasang luar ini sering di kenal sebagai gardu induk konvensional hal ini di karenakan rata-rata gardu induk yang ada di Indonesia menggunakan gardu induk konvensional.

2. Gardu Induk Pasang Dalam

Gardu induk pasang dalam ini merupakan gardu induk hampir seluruh komponennya (busbar, isolator, sistem kontrol, sistem proteksi, dan sistem kendali) di pasang di dalam gedung dan hanya transformator dayanya saja lah yang di letakan di luar gedung. Gardu induk pasang dalam ini sering di kenal dengan GIS (*Gas Insulated Substation*) . gardu induk pasang dalam ini biasanya di bangun di daerah perkotaan ataupun di lingkungan padat penduduk.

3. Gardu Induk Kombinasi

Gardu induk kombinasi ini merupakan gabungan antara gardu induk pasang dalam dan pasang luar yang sebagian komponen switchgearnya di letakan di dalam gedung dan sebagian komponen switchgearnya lagi di letakan di luar seperti gantry (tie line) dan saluran udara tegangan tinggi (SUTT) sebelum masuk ke dalam switchgear dan juga transformator daya.

C. Gardu Induk Berdasarkan Fungsinya adalah sebagai berikut:

1. Gardu Induk Penaik Tegangan

Gardu induk penaik tegangan terletak di area pembangkit tenaga listrik yang bertujuan sebagai menaikkan tegangan yang di hasilkan dari generator untuk di naikan menjadi tegangan ekstra tinggi atau tegangan tinggi. Di naikainya tegangan yang di hasilkan oleh generator hal ini karena tegangan output yang di hasilkan oleh generator kecil sedangkan tegangan tersebut perlu di transmisikan pada jarak yang jauh maka, agar lebih efisien tegangan tersebut di naikan.

2. Gardu Induk Penurun Tegangan

Gardu induk penurun tegangan berfungsi sebagai penurun tegangan dari tegangan ekstra tinggi menjadi tegangan tinggi ataupun tegangan tinggi menjadi tegangan rendah (menengah) atau tegangan distribusi. Gardu induk penurun tegangan ini terletak di pusat beban.

3. Gardu Induk Pengatur Tegangan

Gardu induk pengatur tegangan terletak jauh dengan pembangkit tenaga listrik. Hal ini di karenakan ketika listrik di transmisikan sangat jauh maka akan terjadi drop tegangan yang cukup besar. Dengan situasi yang demikian maka di perlukan gardu induk pengatur tegangan untuk menjaga tegangan kembali menjadi normal.

4. Gardu Induk Pengatur Beban

Pada gardu induk ini terdapat beban motor yang suatu saat menjadi generator untuk membangkitkan tenaga listrik dan suatu saat generator akan menjadi motor atau beban yang berfungsi sebagai memompakan air ke dalam kolam utama.

D. Gardu Induk Berdasarkan Isolasi yang Digunakan adalah sebagai berikut:

1. Gardu Induk dengan Menggunakan Isolasi Udara

Gardu induk dengan menggunakan isolasi udara adalah gardu induk yang isolasi antara bagian yang bertegangan dengan yang bertegangan lainnya menggunakan udara. Gardu induk yang menggunakan isolasi udara ini sering disebut dengan gardu induk konvensional dan memerlukan lahan yang cukup luas.

2. Gardu Induk dengan Menggunakan Isolasi Gas SF₆

Gardu induk dengan menggunakan isolasi gas SF₆ adalah gardu induk yang isolasi antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang bertegangan lainnya ataupun antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan dengan menggunakan gas SF₆. Gardu induk ini sering disebut GIS (*Gas Insulated Substation*) dan tidak memerlukan lahan yang cukup luas.

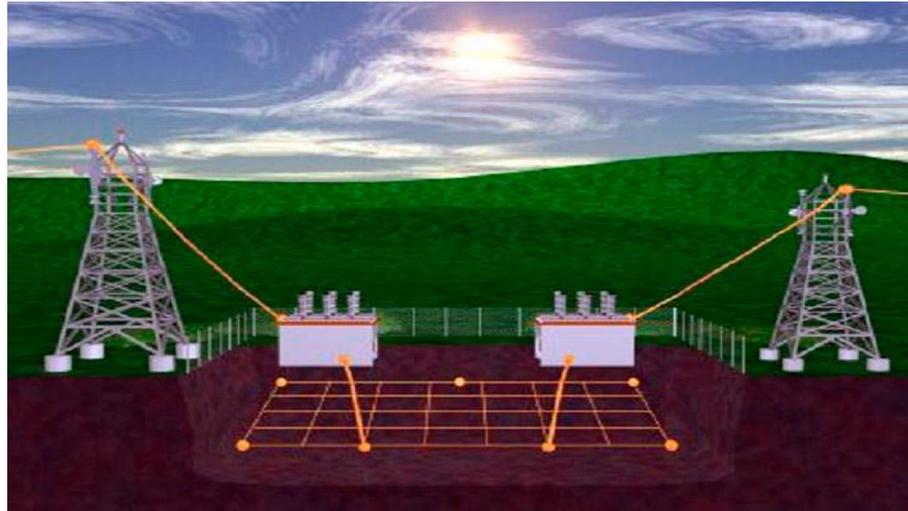
2.2.5 Sistem Pentanahan Gardu induk

Sistem pentanahan gardu induk ini merupakan suatu sistem yang sangat penting yang ada di gardu induk dengan tujuan sebagai pengamanan untuk mencegah meluasnya gangguan yang timbul akibat adanya kenaikan potensial tanah ketika ada arus gangguan.

Fungsi dari sistem pentanahan gardu induk ini adalah membatasi tegangan yang timbul antara peralatan dengan peralatan maupun peralatan dengan tanah dengan meratakan nilai gradient tegangan yang timbul pada permukaan tanah akibat dari arus gangguan yang mengalir ke dalam tanah.

Untuk sistem pentanahan yang digunakan pada gardu induk umumnya menggunakan susunan elektroda berbentuk grid atau kisi-kisi hal ini dikarenakan sulitnya untuk menemukan nilai tahanan

pentanahan yang baik maka dari itu di gunakanlah susunan elektroda berbentuk grid. Menggunakan bentuk pentanahan berupa bujur sangkar di harapkan muatan yang ada pada permukaan penghantar konduktor yang berbentuk grid sama. Berikut ini gambaran dari sistem pentanahan pada gardu induk dapat di lihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sistem Pentanahan Gardu Induk

2.2.6 Konduktor Penghantar Listrik

Penghantar merupakan suatu zat baik itu dalam bentuk padat, cair maupun gas karena sifat dari zat tersebut yang dapat menghantarkan arus maka sering disebut dengan konduktor. Konduktor penghantar listrik yang baik adalah yang memiliki nilai tahanan jenis yang kecil. Berikut ini tabel 2.4 jenis-jenis konduktor dan nilai dari tahanan jenisnya:

Tabel 2.4 Jenis-Jenis Konduktor dan Tahanan Jenisnya

Sifat	Bahan Konduktor	Tahanan Jenis (Ohm Meter)
Konduktor	Perak	$1,59 \times 10^{-8}$
	Tembaga	$1,68 \times 10^{-8}$
	Emas	$2,44 \times 10^{-8}$
	Alumunium	$2,65 \times 10^{-8}$
	Tungsten	$5,6 \times 10^{-8}$
	Besi	$9,71 \times 10^{-8}$
	Platina	$10,6 \times 10^{-8}$
	Raksa	98×10^{-8}
	Nikrom	100×10^{-8}
Semi Konduktor	Karbon	$(3-60) \times 10^{-5}$
	Germanium	$(1-500) \times 10^{-5}$
	Silikon	0,1 – 60

Berdasarkan tabel diatas merupakan bahan-bahan konduktor yang sering di gunakan sebagai penghantar pada sistem tenaga listrik. Semakin kecil nilai tahananannya maka semakin baik sebagai penghantar listrik.

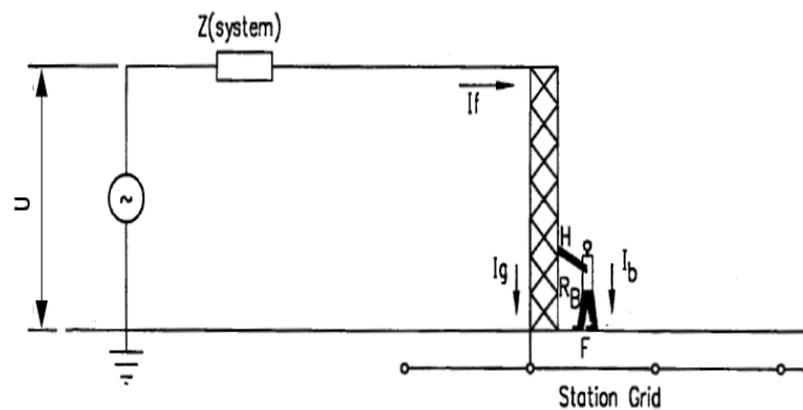
2.2.7 Tegangan Sentuh

Tegangan Sentuh adalah tegangan yang di hasilkan oleh suatu objek yang di sentuh dengan jarak 1 meter dengan kondisi objek yang di sentuh tersebut terhubung dengan sistem pentanahan. Tegangan sentuh ini juga sering sekali menjadi penyebab permasalahan aliran arus gangguan tanah (*ground fault current*) yang di akibatkan karena terjadinya beda tagangan antara titik kontak ke tanah dan struktur

konduktif yang saling berdekatan. Tegangan sentuh ini bisa terjadi di karenakan 2 faktor yaitu:

1. Tangan orang bersentuhan secara langsung dengan kawat beraliran listrik.
2. Tangan orang bersentuhan secara tidak langsung ketika terjadi kerusakan pada tahanan isolasi suatu peralatan listrik dan orang menyentuh peralatan listrik tersebut yang bersangkutan dan terkena bahaya tegangan sentuh secara tidak langsung.

Berikut ini merupakan gambaran terjadinya tegangan sentuh dapat dilihat pada gambar 2.5 Kondisi Tegangan Sentuh.



Gambar 2.5 Kondisi Tegangan Sentuh

A. Tegangan Sentuh yang Diizinkan

Berikut ini merupakan persamaan untuk mencari nilai tegangan sentuh adalah sebagai berikut:

$$E_s = I_f (R_k + 1,5 p_s) \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan: E_s = Tegangan Sentuh (Volt)

I_f = Arus Fibrasi (Ampere)

R_k = Tahanan Badan Manusia (Ohm)

ρ_s = Tahanan Jenis Tanah Pada Permukaan Tanah (Ohm)

adapun batasan nilai dari tegangan sentuh yang diizinkan dan lamanya waktu gangguan yang diizinkan berdasarkan tabel 2.5 batasan nilai tegangan sentuh dan lamanya waktu gangguan yang diizinkan adalah sebagai berikut:

Tabel 2.5 Batasan Nilai Tegangan Sentuh dan Lamanya Waktu Gangguan yang Diizinkan

Lama Gangguan (t , detik)	Tegangan Sentuh (Volt)
0,1	1.980
0,2	1.400
0,3	1.140
0,4	990
0,5	890
1	626
2	443
3	362

B. Tegangan Sentuh Sebenarnya

Berikut ini merupakan persamaan untuk mencari nilai tegangan sentuh yang sebenarnya:

$$E_m = K_m K_i \rho \frac{I}{L} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan : ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-Meter)

K_m = Koefisien Tegangan Sentuh

I = Arus Gangguan Tanah (Ampere)

L = Panjang total konduktor (Meter)

$K_i = 0,65 + 0,172.n$

Dimana :

$$Km = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{8} \times \frac{9}{10} \times \dots \times \frac{2(n-2)+1}{2(n-2)+2} \right) =$$

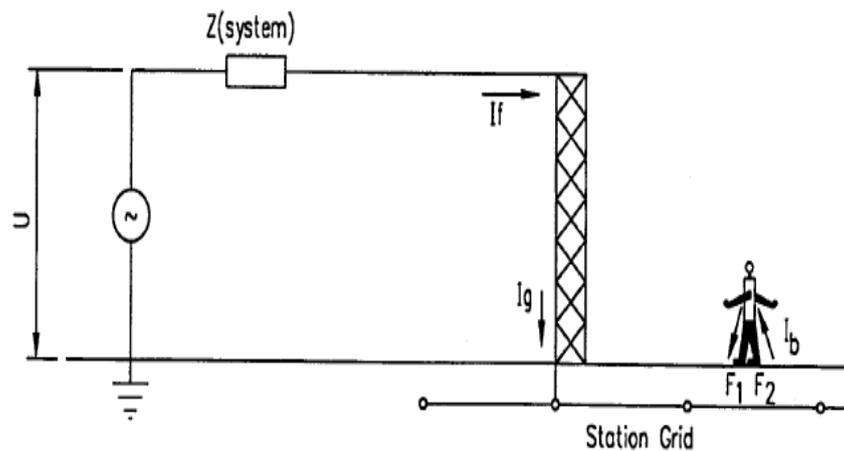
D = Jarak konduktor paralel pada kisi-kisi

n = Jumlah Konduktor Paralel

d = Diameter Konduktor Kisi-Kisi

2.2.8 Tegangan Langkah

Tegangan Langkah adalah tegangan yang timbul diantara dua kaki yang berdiri diatas permukaan tanah yang di akibatkan apabila arus gangguan yang mengalir ke tanah menimbulkan adanya beda potensial diantara dua kaki. Semakin dekat dengan titik gangguan maka semakin besar arus dan tegangannya. Berikut merupakan gambaran terjadinya tegangan langkah dapat dilihat pada gambar 2.6 kondisi tegangan langkah.



Gambar 2.6 Kondisi Tegangan Langkah

A. Tegangan Langkah yang Diizinkan

Berikut ini merupakan persamaan untuk mencari nilai tegangan langkah yang diizinkan adalah sebagai berikut:

$$E_l = I_f (R_k + 6 \rho_s) \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan: E_l = Tegangan Langkah (Volt)

I_f = Arus Fibrasi (Ampere)

R_k = Tahanan Badan Manusia (Ohm)

ρ_s = Tahanan Jenis Tanah Pada Permukaan Tanah (Ohm)

Adapun batasan nilai tegangan langkah yang diizinkan dengan lamanya waktu yang diizinkan berdasarkan tabel 2.6 batas tegangan langkah dan lamanya waktu gangguan yang diizinkan adalah sebagai berikut:

Tabel 2.6 Batasan Nilai Tegangan Langkah dan Lamanya Waktu Gangguan yang Diizinkan

Lama Gangguan (t, detik)	Tegangan Langkah (Volt)
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

B. Tegangan Langkah yang Sebenarnya

Berikut ini merupakan persamaan untuk mencari nilai tegangan langkah yang sebenarnya:

$$E_{lm} = K_s K_i \rho \frac{I}{L} \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan : ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-Meter)

K_s = Koefisien Tegangan Langkah

I = Arus Gangguan Tanah (Ampere)

K_i = $0,65 + 0,172 \cdot n$

L = Panjang total konduktor (Meter)

Dimana :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \dots \dots + \frac{1}{(n-1)D} \right)$$

D = Jarak konduktor paralel pada kisi-kisi (meter)

n = Jumlah Konduktor Paralel

h = Kedalaman penanaman konduktor pengetanahan (meter)

2.2.9 Arus Yang Mengalir Pada Tubuh Manusia

Tubuh manusia merupakan suatu penghantar yang memiliki nilai impedansi berkisar 500-100.000 ohm, oleh sebab itu apabila salah satu bagian tubuh mengalami kontak langsung dengan bodi peralatan yang bertegangan karena terjadinya kegagalan isolasi, maka akan ada arus mengalir dalam tubuh. Kemampuan tubuh manusia dalam menerima arus beraneka ragam, hal ini disebabkan karena daya tahan tubuh setiap manusia yang berbeda-beda. Namun terdapat batas arus yang mengalir pada tubuh yang dikemukakan oleh Dr. Hanz Prinz beserta pengaruhnya terhadap tubuh manusia dapat dilihat pada tabel 2.7 Batas Arus dan Pengaruhnya Pada Tubuh Manusia adalah sebagai berikut:

Tabel 2.7 Batas Arus dan Pengaruhnya Pada Tubuh Manusia

No	Besar Arus	Pengaruh Pada Tubuh Manusia
1	0-0,9 mA	Tidak berpengaruh dan menimbulkan reaksi.
2	0,9-1,2 mA	Terasa ada arus listrik namun tidak menimbulkan kejang, kontraksi, dan kehilangan kontrol.
3	1,2-1,6 mA	Mulai terasa ada aliran listrik pada tangan.
4	1,6-6,0 mA	Tangan sampai siku mulai terasa kesemutan.
5	6,0-8,0 mA	Tangan mulai kaku dan terasa kesemutan.
6	13-15 mA	Rasa sakit tidak tertahankan.
7	15-20 mA	Mulai lemas dan tidak dapat melepaskan penghantar.
8	20-50 mA	Merusak organ tubuh manusia.
9	50-100 mA	Dapat menyebabkan kematian.

Banyak ahli melakukan riset terhadap manusia secara langsung maupun hewan untuk mengetahui batas terhadap tubuh manusia dalam menerima arus listrik. Batas arus yang ada di bagi menjadi 4 sebagai berikut:

1. Arus Persepsi

Arus Persepsi ini diibaratkan seperti ketika seseorang memegang langsung suatu penghantar yang bertegangan sedikit demi sedikit tegangan tersebut dinaikan secara perlahan. Arus mengalir tadi perlahan-lahan akan memberi pengaruh pada tubuh manusia dan apabila arus tersebut arus searah maka efeknya akan terasa akan lebih panas. Berdasarkan *Electrical Testing Laboratory Network* tahun 1993 telah di lakukan uji coba kepada 40 orang laki-laki dan perempuan dan di dapat sebuah data bahwa nilai arus rata-

rata yang mengalir pada tubuh manusia (*threshold of perception current*) adalah sebagai berikut:

- Laki-Laki = 1,1 mA
- Perempuan = 0,7 mA

2. Pengaruh Arus Terhadap Otot

Mengalirnya arus pada tubuh manusia akan berpengaruh terhadap kinerja otot bila arus persepsi di naikan secara terus-menerus maka, orang akan merasakan rasa sakit dan dapat membuat otot menjadi kaku sehingga menjadikan otot-otot pada tubuh manusia menjadi lemas dan sulit melepaskan dari konduktor bertegangan yang di pegangnya. Berdasarkan riset yang di lakukan oleh *university of California medical school* telah di lakukan percobaan terhadap 134 laki-laki dan 28 perempuan dan di peroleh nilai arus rata-rata yang mempengaruhi kinerja otot adalah sebagai berikut:

- Laki-Laki = 16 mA
- Perempuan = 10,5 mA

Berdasarkan penelitian diatas di tetapkan batas nilai arus maksimal dimana orang dapat melepaskan konduktor bila terkena sengatan arus listrik sebagai berikut:

- Laki-Laki = 9 mA
- Perempuan = 6 mA

3. Arus Fibrilasi

Arus Fibrilasi adalah arus yang mempengaruhi jantung atau biasa disebut *ventricular fibrillation* yaitu arus yang menyebabkan gagal jantung dan peredaran darah yang tidak stabil apabila tidak di tangani secara serius. Arus fibrilasi ini nilainya lebih besar dari arus yang mempengaruhi kinerja otot dan dapat menyebabkan pingsan bahkan kematian. Berdasarkan percobaan yang di lakukan

oleh Dalziel bahwa 99,5% manusia yang beratnya lebih dari 59 kg masih dapat bertahan dari besar arus dan waktu yang di tentukan dari persamaan berikut :

$$I_f = \frac{k}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana : I_f = Besarnya arus yang melalui tubuh manusia (Ampere)

t = Waktu gangguan (detik)

$$k = \sqrt{k}$$

$k = 0,0135$ untuk manusia dengan berat badan 50 kg

$= 0,0246$ untuk manusia dengan berat badan 70 kg

Maka : $k_{50} = 0,116$ A

$k_{70} = 0,157$ A

4. Arus Reaksi

Arus Reaksi adalah arus yang nilainya kecil dan dapat membuat orang terkejut dan dapat mengakibatkan kecelakaan yang kecil bahkan fatal. Seperti halnya apabila orang merasakan arus reaksi ini maka akan merasa terkejut yang bisa mengakibatkan di terjatuh ataupun melempar peralatan yang di pegangnya dan melemparnya ke instalasi yang lebih tinggi maka bisa menjadi kecelakaan yang fatal.

2.2.10 Tahanan Tubuh Manusia

Nilai tahanan pada tubuh manusia nilainya berkisar antara 500 Ω sampai dengan 100.000 Ω nilai tersebut bergantung kepada nilai tegangannya, keadaan kulit pada tempat kontak dan jalannya arus pada tubuh manusia. Pada kulit manusia memiliki lapisan tanduk yang memiliki nilai tahanan yang tinggi, tetapi jika kulit menyentuh konduktor bertegangan tinggi maka kulit yang menyentuh akan

langsung terbakar. Jadi nilai tahanan yang ada pada kulit manusia tidak berarti apa-apa hanya sebagai pembatas arus yang mengalir pada tubuh manusia. Beberapa peneliti melakukan penelitian terhadap tahanan tubuh manusia dengan hasil yang tertera pada tabel 2.8 adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 8 Nilai Tahanan Tubuh Manusia

No	Peneliti	Tahanan (Ohm)	Keterangan
1	Dalziel	500	Dengan Tegangan 60 cps.
2	AIEE Committee Report 1958	2.330	Dengan Tegangan 21 Volt. Tangan ke Tangan $I_k = 9$ mA.
		1.130	Tangan ke Kaki.
		1.680	Tangan ke Tangan dengan Arus Searah.
		800	Tangan ke Kaki dengan 50 cps.
3	Laurent	3.000	

Berdasarkan dari hasil penelitian yang di lakukan oleh beberapa ahli diatas di dapatkan nilai pendekatan untuk nilai tahanan pada tubuh manusia sebesar 1.000 Ohm.