

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Gardu induk merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik yang mempunyai kemungkinan mengalami bahaya yang disebabkan oleh timbulnya gangguan. Oleh karena itu sistem pembumian pada gardu induk sangat diperlukan. Karena sistem pembumian ini akan mengamankan peralatan dan manusia yang berada di gardu induk tersebut.

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

Tujuan dari sistem pentanahan secara umum adalah:^[5]

1. Menjamin keselamatan orang dari sengatan listrik baik dalam keadaan normal atau tidak dari tegangan sentuh dan tegangan langkah.
2. Menjamin kerja peralatan listrik/elektronik.
3. Mencegah kerusakan peralatan listrik/elektronik.

Pembumian peralatan berlainan dengan pembumian sistem, yaitu pembumian bagian dari peralatan yang pada kerja normal tidak dilalui arus. Tujuan dari pembumian peralatan tersebut adalah untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang tidak dilalui arus dan antara bagian-bagian ini dengan tanah sampai pada suatu harga yang aman untuk semua kondisi operasi normal atau tidak normal.

Secara singkat tujuan pengetanahan itu dapat diformulasikan sebagai berikut:^[1]

1. Mencegah terjadinya tegangan kejut listrik yang berbahaya untuk orang dalam daerah itu.

2. Untuk memungkinkan timbulnya arus tertentu baik besarnya maupun lamanya dalam keadaan gangguan tanah tanpa menimbulkan kebakaran atau ledakan pada bangunan atau isinya.
3. Untuk memperbaiki penampilan (*performance*) dari sistem.

Dalam instalasi listrik, ada 4 bagian yang harus dibumikan. Empat bagian dari instalasi listrik yang harus dibumikan adalah:^[2]

1. Semua bagian instalasi yang terbuat dari logam yang dalam keadaan normal tidak bertegangan dan dengan mudah dapat disentuh oleh manusia. Hal ini perlu agar potensial dari logam yang mudah disentuh manusia selalu sama dengan potensial tanah (bumi) tempat manusia berpijak sehingga tidak berbahaya bagi manusia yang menyentuhnya.
2. Bagian pembuangan muatan listrik (bagian bawah) dan *Lightning Arrester*. Hal ini diperlukan agar *Lightning Arrester* berfungsi dengan baik, yaitu membuang muatan listrik yang diterimanya dari petir ke tanah (bumi) dengan lancar.
3. Kawat petir yang ada pada bagian atas saluran transmisi. Kawat petir ini sesungguhnya juga berfungsi sebagai penangkap petir. Karena letaknya yang ada di sepanjang saluran transmisi, maka semua kaki tiang transmisi harus ditanahkan agar petir yang menyambar kawat petir dapat disalurkan ke tanah dengan lancar melalui kaki tiang transmisi.
4. Titik netral dari transformator atau titik netral dari generator. Hal ini diperlukan dalam kaitan dengan keperluan proteksi khususnya yang menyangkut gangguan hubung tanah.

Sistem pembumian gardu induk harus dapat memastikan operasi yang aman dan handal pada sistem tenaga, dan menjamin keselamatan manusia jika terjadi gangguan. Untuk itu desain pembumian pada gardu induk harus sesuai standar yang berlaku. Standar yang umum digunakan dalam desain pembumian gardu induk adalah IEEE Std. 80-2000.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Gardu Induk *Switchgear*

Sebagian besar gardu induk di Indonesia adalah gardu induk konvensional namun untuk daerah-daerah yang padat pemukiman dan di kota-kota besar di Pulau Jawa, sebagian menggunakan gardu induk pasangan dalam, yang disebut juga *Gas Insulated Substation* atau *Gas Insulated Switchgear* (GIS).

GIS adalah gardu induk yang hampir semua komponennya (busbar, isolator, *switchgear*, komponen kontrol, kubikel, komponen kendali) dipasang didalam gedung kecuali transformator daya yang dipasang diluar gedung. GIS merupakan bentuk pengembangan dari gardu induk, yang pada umumnya dibangun di daerah perkotaan atau padat pemukiman yang sulit untuk mendapatkan lahan.

Beberapa keunggulan GIS dibandingkan dengan GI konvensional:

1. Hanya membutuhkan lahan seluas ± 3.000 meter persegi atau $\pm 6\%$ dari luas lahan GI konvensional.
2. Dapat dipasang di tengah kota yang padat pemukiman.
3. Keunggulan dari segi estetika dan arsitektual, karena bangunan bisa didesain sesuai kondisi sekitarnya.

Gas Insulated Switchgear menggunakan gas SF₆ sebagai isolasi antara bagian yang bertegangan yang satu dengan bagian lain yang bertegangan, maupun antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan.

2.2.2 Sistem Penumbumian Peralatan

Sistem penumbumian pada peralatan yaitu penghubungan antara bagian-bagian peralatan listrik pada keadaan normal tidak dialiri arus. Tujuannya adalah untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang tidak dialiri arus dan antara bagian-bagian ini dengan tanah sampai pada suatu harga yang aman untuk semua kondisi operasi normal maupun saat terjadi gangguan.

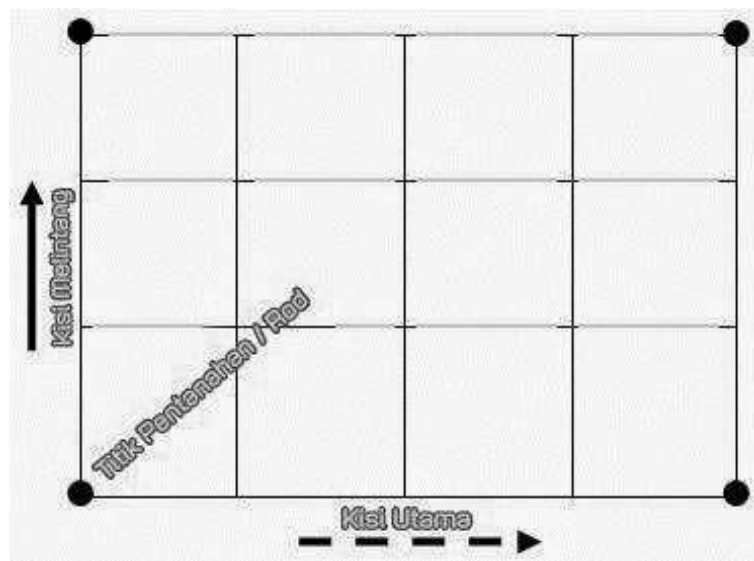
Sistem penumbumian pada peralatan pada umumnya menggunakan dua macam yaitu sistem *grid* (horizontal) dan sistem *rod* (vertikal). Sistem penumbumian *grid* ialah menanamkan batang-batang elektroda sejajar dengan permukaan

tanah, hal ini merupakan usaha untuk meratakan tegangan yang timbul. Sedangkan sistem *rod* ialah menanamkan batang-batang elektroda tegak lurus kedalam tanah, hal ini fungsinya hanya mengurangi (memperkecil) tahanan pbumian. Jadi yang membedakan sistem ini adalah dengan cara penanaman elektrodanya.

Adapun penjelasan dari sistem *grid* dan sistem *rod* adalah sebagai berikut: ^[5]

1. Sistem Pbumian *Grid*

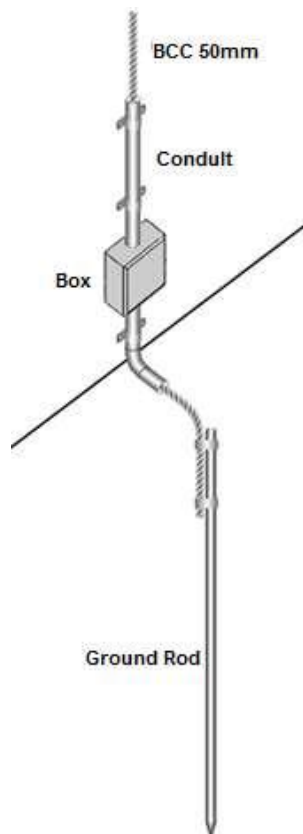
Pbumian ini mula-mula dimaksudkan untuk mengatasi perbedaan tegangan dipermukaan tanah apabila terjadi gangguan. Tetapi dari hasil penelitian, terbukti bentuk ini juga dapat digunakan sebagai pbumian utama, bahkan mempunyai beberapa kelebihan dari pbumian sistem lama. Caranya ialah dengan menanam batang elektroda sejajar dengan tanah. Untuk mengecilkan tahanan pbumian pada suatu area tertentu, tidak dapat dengan terus menerus menambah batang elektroda pentanahan, hal ini karena volume tanah terbatas kemampuannya untuk menerima arus.



Gambar 2.1 Pbumian *Grid*

2. Sistem Pembumian *Rod*

Pembumian sistem ini adalah sama dengan *driven ground* yang digunakan pada menara transmisi. Untuk memperoleh harga tahanan yang lebih kecil maka dapat digunakan batang-batang elektroda yang lebih banyak yang ditanam paralel tegak lurus permukaan tanah. Makin pendek jarak antara elektroda dan makin banyak jumlah elektroda yang ditanam, maka makin kecil konduktivitasnya.



Gambar 2.2 Pembumian *Rod*

2.2.3 Elektroda Pembumian

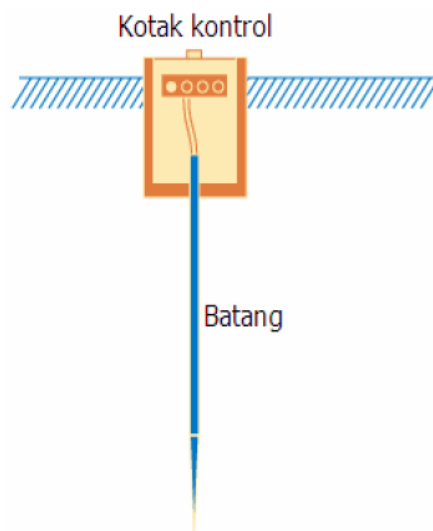
Yang dimaksud dengan elektroda pembumian adalah sebuah atau sekelompok penghantar yang ditanam dalam bumi dan mempunyai kontak yang erat dengan bumi dan menyertai hubungan listrik dengan bumi. Elektroda pembumian tertanam sedemikian rupa dalam tanah berupa elektroda pita, logam, batang konduktor, pipa air minum dari tulang besi beton pada tiang pancang. Untuk mendapatkan harga resistansi pembumian yang serendah mungkin harus memenuhi beberapa persyaratan antara lain:

1. Resistansi elektroda pembumian harus lebih kecil dari pada harga yang direkomendasikan.
2. Elektroda pembumian harus mampu dialiri arus hubung singkat terbesar.
3. Elektroda pembumian harus mempunyai sifat kimia yang baik sehingga tidak mudah mengalami korosi.
4. Elektroda pembumian harus mempunyai sifat mekanis yang baik.

Pada umumnya elektroda-elektroda pembumian ditanam sejajar satu sama lainnya untuk kedalaman beberapa puluh sentimeter di dalam tanah. Untuk itu ada beberapa macam elektroda pentanahan yang biasa dipakai seperti elektroda batang, elektroda pita, dan elektroda plat.

1. Elektroda Batang

Elektroda batang ialah elektroda dari pipa atau besi baja profil yang ditanamkan kedalam tanah. Elektroda ini merupakan elektroda yang pertama kali digunakan dan teori-teori berawal dari elektroda jenis ini. Elektroda ini banyak digunakan di gardu-gardu induk. Secara teknis, elektroda batang ini mudah pemasangannya, yaitu tinggal ditanamkan ke dalam tanah dan elektroda ini tidak memerlukan lahan yang luas.

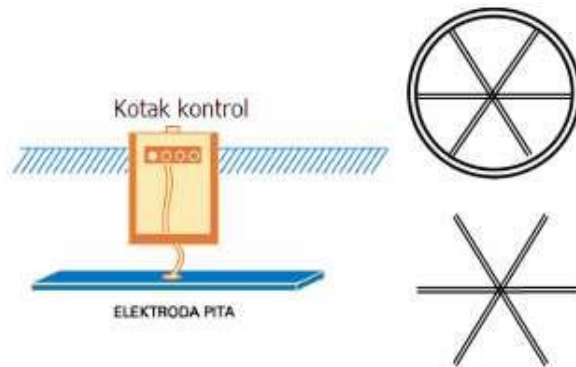


Gambar 2.3 Elektroda Batang

2. Elektroda pita

Elektroda pita ialah elektroda yang terbuat dari hantaran berbentuk pita atau berpenampang bulat atau hantaran pilin yang pada umumnya ditanam secara dangkal. Jika pada elektroda jenis batang, pada umumnya ditanam secara dalam. Pemasangan ini akan bermasalah apabila mendapati lapisan-lapisan tanah yang

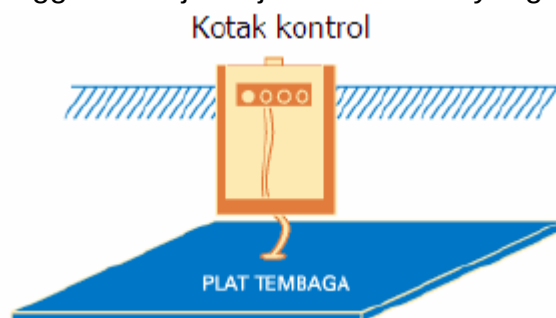
berbatu, disamping sulit penanamannya, untuk mendapatkan nilai tahanan yang rendah juga bermasalah. Sebagai pengganti penanaman secara vertikal ke dalam tanah, dapat dilakukan dengan menanam batang hantaran secara mendatar (horizontal) dan dangkal. Tahanan pentanahan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh bentuk konfigurasi elektrodanya, seperti dalam bentuk melingkar, radial, atau kombinasi antar keduanya.



Gambar 2.4 Elektroda Pita

3. Elektroda Pelat

Elektroda pelat ialah elektroda dari bahan pelat logam (utuh atau berlubang) atau dari kawat fasa. Pada umumnya elektroda ini ditanam dalam tanah. Elektroda ini digunakan bila diinginkan tahanan pentanahan yang kecil dan sulit diperoleh dengan menggunakan jenis-jenis elektroda yang lain.



Gambar 2.5 Elektroda Pelat

2.2.4 Tahanan Pembumian

Tahanan pembumian harus sekecil mungkin untuk menghindari bahaya - bahaya yang ditimbulkan oleh adanya arus gangguan tanah. Hantaran netral harus diketanahkan di dekat sumber listrik atau transformator, pada saluran udara setiap 200 m dan disetiap konsumen. Tahanan pentanahan satu elektroda di dekat sumber listrik, transformator atau jaringan saluran udara dengan jarak

200 m maksimum adalah 10 Ohm dan tahanan pentanahan dalam suatu sistem tidak boleh lebih dari 5 Ohm.

Seperti yang telah disampaikan di atas bahwa tahanan pembumian diharapkan bisa sekecil mungkin. Namun dalam prakteknya tidaklah selalu mudah untuk mendapatkannya karena banyak faktor yang mempengaruhi tahanan pentanahan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi besar tahanan pentanahan adalah:^[6]

1. Bentuk elektroda.

Ada bermacam-macam bentuk elektroda yang banyak digunakan, seperti jenis batang, pita dan pelat.

2. Jenis bahan dan ukuran elektroda.

Sebagai konsekuensi peletakannya di dalam tanah, maka elektroda dipilih dari bahan-bahan tertentu yang memiliki konduktivitas sangat baik dan tahan terhadap sifat-sifat yang merusak dari tanah, seperti korosi. Ukuran elektroda dipilih yang mempunyai kontak paling efektif dengan tanah.

3. Jumlah/konfigurasi elektroda.

Untuk mendapatkan tahanan pentanahan yang dikehendaki dan bila tidak cukup dengan satu elektroda, bisa digunakan lebih banyak elektroda dengan bermacam-macam konfigurasi pemancangannya di dalam tanah.

4. Kedalaman pemancangan/penanaman di dalam tanah.

Pemancangan ini tergantung dari jenis dan sifat-sifat tanah. Ada yang lebih efektif ditanam secara dalam, namun ada pula yang cukup ditanam secara dangkal.

5. Faktor-faktor alam.

a. Jenis tanah: tanah gembur, berpasir, berbatu, tanah kerikil, tanah rawa.

b. kelembaban tanah: semakin tinggi kelembaban atau kandungan air dalam tanah akan memperendah tahanan jenis tanah.

c. kandungan mineral tanah: air tanpa kandungan garam adalah isolator yang baik dan semakin tinggi kandungan garam akan memperendah tahanan jenis tanah, namun meningkatkan korosi.

- d. suhu tanah: suhu akan berpengaruh bila mencapai suhu beku dan di bawahnya. Untuk wilayah tropis seperti Indonesia tidak ada masalah dengan suhu karena suhu tanah ada di atas titik beku.

2.2.5 Tahanan Jenis Tanah^[1]

Adalah faktor keseimbangan antara tahanan pentanahan dan kapasitansi disekelilingnya yang direpresentasikan dengan ρ (rho).

Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung dari beberapa faktor yaitu:

1. Jenis tanah: tanah gembur, berpasir, berbatu, tanah kerikil, tanah rawa.
2. Lapisan tanah: berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan atau *uniform*.
3. Kelembaban tanah.
4. Temperatur.

Tahanan jenis tanah bervariasi dari 500 sampai 50.000 Ohm per cm³. Kadang-kadang harga ini dinyatakan dengan harga Ohm per cm.

Untuk mengubah komposisi kimia tanah dapat dilakukan dengan memberikan garam pada tanah dekat elektroda pembedaan dengan maksud mendapatkan tahanan jenis tanah yang rendah. Cara ini hanya baik untuk sementara sebab penggaraman harus dilakukan secara periodik, sedikitnya 6 (enam) bulan sekali.

Dengan memberi air atau membasahi tanah juga mengubah tahanan jenis tanah. Harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangatlah tergantung dengan keadaan cuaca. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata-rata, maka diperlukan suatu perencanaan maka diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu yang tertentu misalnya selama 1 (satu) tahun. Biasanya tahanan jenis tanah juga tergantung dari tingginya permukaan air yang konstan.

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, pembedaan dapat dilakukan dengan menanamkan elektroda pembedaan mencapai kedalaman dimana terdapat air yang konstan. Penanaman memungkinkan kelembaban dan temperatur bervariasi, harga tahanan jenis

tanah harus diambil pada keadaan yang paling buruk, yaitu tanah kering dan dingin.

Untuk melihat gambaran mengenai besarnya tahanan jenis tanah untuk bermacam-macam jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.1 dibawah ini: ^[3]

Tabel 2.1 Resistansi Jenis Tanah

Jenis Tanah	Tanah Rawa	Tanah Liat dan Tanah Ladang	Pasir Basah	Kerikil Basah	Pasir dan Kerikil Kering	Tanah Berbatu
Tahanan Jenis (Ohm-Meter)	30	100	200	500	1000	3000

2.2.6 Macam-Macam Tegangan ^[1]

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

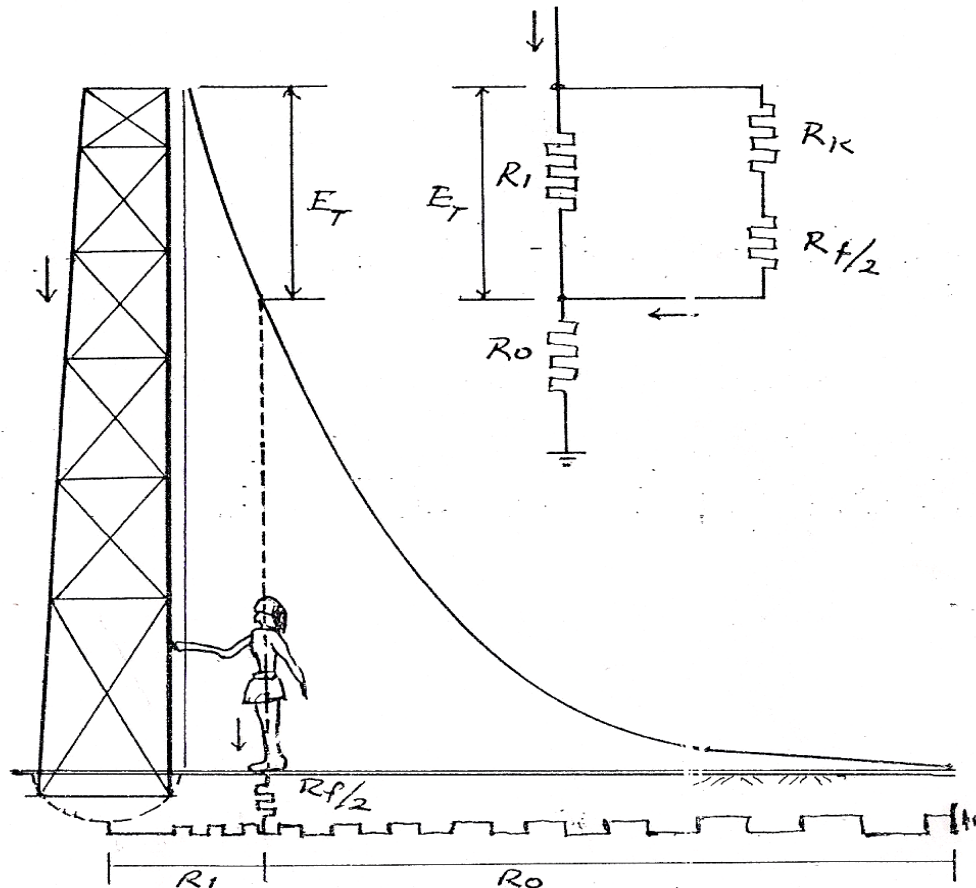
- a. Tegangan sentuh
- b. Tegangan langkah
- c. Tegangan pindah

1. Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat di antara suatu objek yang disentuh dan suatu titik berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan sistem pembumian yang berada di bawahnya. Seperti diketahui, semua orang yang memiliki kontak dengan jaringan

bertegangan pasti mengalami beda potensial. Orang tersebut beresiko kesetrum (bukan pasti kesetrum).

Besarnya arus gangguan dibatasi oleh tahanan manusia dan tahanan kontak ke tanah dari kaki manusia tersebut seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 6 Tegangan Sentuh dan Rangkaian Penggantinya

Dari gambar rangkaian pengganti dapat dilihat hubungan sebagai berikut:

$$E_{\text{touch}} = (R_k + \frac{R_f}{2}) \cdot I_k \dots \dots \dots (2.1)$$

Tahanan tubuh manusia telah diselidiki oleh beberapa ahli dan sebagai harga pendekatan diambil $R_k = 1000 \text{ Ohm}$. Tahanan R_f mendekati harga $3p_s$ dimana p_s adalah tahanan jenis tanah di sekitar permukaan. Sehingga rumus dapat diturunkan menjadi:

$$E_{\text{touch}} = (R_k + \frac{3p_s}{2}) \cdot I_k \dots \dots \dots (2.2)$$

Karena tanah pada pembumian dilapisi oleh koral, pasir ataupun kerikil kering maka faktor koreksi (C_s) mempengaruhi tegangan sentuh yang terjadi. Sehingga rumusnya menjadi:

$$E_{\text{touch}} = (R_k + \frac{3 C_s p_s}{2}) \cdot I_k \dots\dots\dots (2.3)$$

Besarnya arus yang melalui tubuh manusia diambil dari persamaan (2.12) pada halaman 23 $I_k = \frac{k}{\sqrt{t}}$, untuk arus yang melalui tubuh manusia dengan berat 50 kg, $I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$ sedangkan arus yang melalui tubuh manusia dengan berat 70 kg, $I_k = \frac{0,157}{\sqrt{t}}$

Dengan demikian tegangan sentuh yang diizinkan menjadi:

$$E_{\text{touch } 50} = (1000 + 1,5 C_s \times p_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$E_{\text{touch } 70} = (1000 + 1,5 C_s \times p_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

R_k = Tahanan tubuh manusia (1000 Ω)

R_f = Tahanan kontak ke tanah dari satu kaki pada tanah yang diberikan lapisan koral, pasir atau krikil kering (Ω) = 3 p_s

p_s = Tahanan jenis lapisan permukaan tanah (Ωm)

I_k = Arus fibrilasi (A)

t = Waktu kejut atau lama gangguan tanah (detik)

Dan karena adanya faktor reduksi (C_s) dari penggunaan koral atau pasir/kerikil kering, maka:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 (1 - \frac{p_1}{p_s})}{2 h_s + 0,09} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

C_s = Faktor reduksi karena ada lapisan permukaan tanah

h_s = Ketebalan lapisan permukaan (m)

p_1 = Tahanan jenis tanah (Ωm)

p_s = Tahanan jenis lapisan permukaan tanah (Ωm)

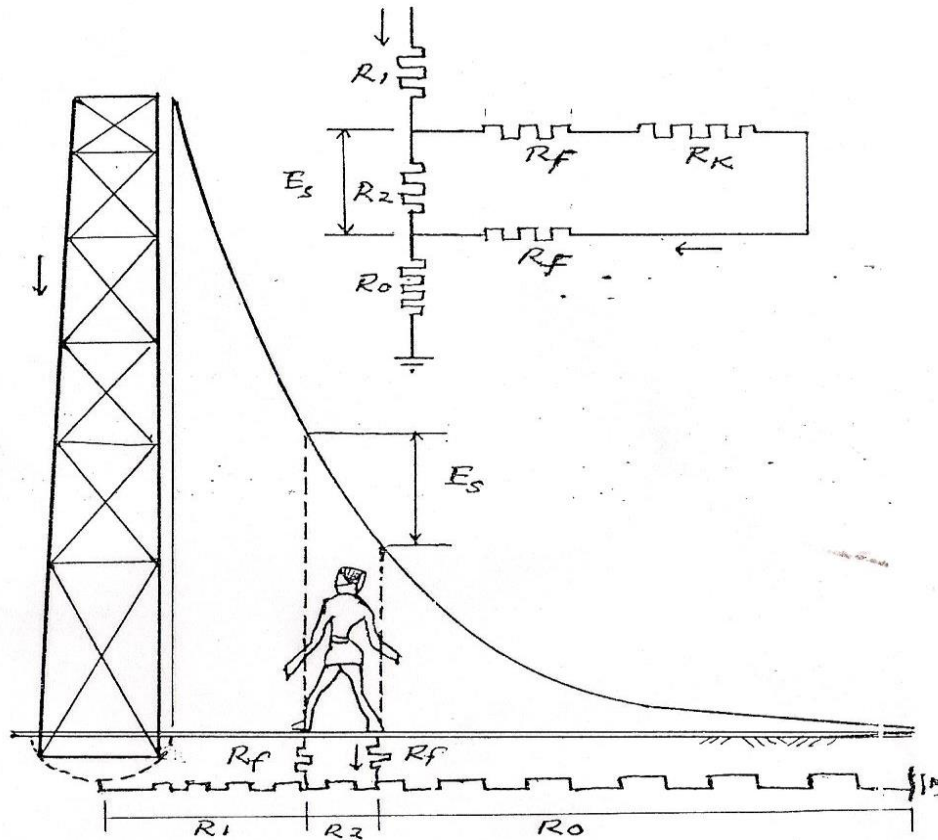
Pada tabel dibawah ini dipaparkan tegangan sentuh yang diizinkan dan batasan waktu sentuh:

**Tabel 2.2 Tegangan Sentuh yang Diizinkan dan Waktu Sentuh
Berdasarkan IEEE Std. 80-2000**

Waktu Sentuh (t) (detik)	Tegangan Sentuh Yang Diizinkan (Volt)
0,1	1980
0,2	1400
0,3	1140
0,4	990
0,5	890
1,0	626
2,0	443
3,0	362

2. Tegangan Langkah

Tegangan langkah adalah tegangan yang timbul di antara dua kaki orang yang sedang berdiri di atas tanah yang sedang dialiri arus gangguan tanah.



Gambar 2.7 Tegangan Langkah dan Rangkaian Penggantinya

Dengan menggunakan rangkaian pengganti dapat ditentukan tegangan langkah yang di izinkan sebagai berikut:

$$E_{step} = (R_k + 2R_f) \cdot I_k \dots\dots\dots (2.7)$$

Tahanan tubuh manusia telah diselidiki oleh beberapa ahli dan sebagai harga pendekatan diambil $R_k = 1000 \text{ Ohm}$. Tahanan R_f mendekati harga $3p_s$ dimana p_s adalah tahanan jenis tanah di sekitar permukaan. Sehingga rumus dapat diturunkan menjadi:

$$E_{step} = (R_k + 2 \times 3 p_s) \cdot I_k \dots\dots\dots (2.8)$$

Karena tanah pada pembumian dilapisi oleh koral, pasir ataupun kerikil kering maka faktor koreksi (C_s) mempengaruhi tegangan sentuh yang terjadi. Sehingga rumusnya menjadi:

$$E_{step} = (R_k + 6 C_s p_s) \cdot I_k \dots\dots\dots (2.9)$$

Besarnya arus yang melalui tubuh manusia diambil dari persamaan (2.12)

pada halaman 23 $I_k = \frac{k}{\sqrt{t}}$, untuk arus yang melalui tubuh manusia dengan berat

50 kg, $I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$ sedangkan arus yang melalui tubuh manusia dengan berat 70

kg, $I_k = \frac{0,157}{\sqrt{t}}$

Dengan demikian tegangan langkah yang diizinkan menjadi:

$$E_{step\ 50} = (1000 + 6 \times C_s p_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$E_{step\ 70} = (1000 + 6 \times C_s p_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana:

R_k = Tahanan tubuh manusia (1000 Ω)

R_f = Tahanan kontak ke tanah dari satu kaki pada tanah yang diberikan lapisan koral, pasir atau krikil kering (Ω) = 3 p_s

p_s = Tahanan jenis lapisan permukaan tanah (Ωm)

I_k = Arus fibrilasi (A)

t = Waktu kejut atau lama gangguan tanah (detik)

Pada tabel dibawah ini dipaparkan tegangan langkah yang diizinkan dan batasan waktu langkah:

Tabel 2.3 Tegangan Langkah yang Diizinkan dan Waktu Langkah Berdasarkan IEEE Std. 80-2000

Waktu Langkah (t) (detik)	Tegangan Langkah yang Diijinkan (Volt)
0,1	7000
0,2	4950
0,3	4040
0,4	3500
0,5	3140
1	2216
2	1560
3	1280

2.2.7 Batasan dan Macam Arus pada manusia ^[4]

1. Batasan Arus Pada Manusia

Tahanan tubuh manusia berkisar diantara 500 Ohm sampai 1000 Ohm tergantung dari tegangan, keadaan kulit pada tempat kontak dan jalannya arus dalam tubuh. Kulit yang terdiri dari lapisan tanduk mempunyai tahanan tinggi, tetapi terhadap tegangan tinggi kulit yang menyentuh konduktor langsung luka 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 orang ahli adalah sebagai berikut:

Tabel 2.4 Berbagai Nilai Tahanan Tubuh Manusia

Diselidiki Oleh	Tahanan (Ohm)	Keterangan
Dalziel	500	Dengan tegangan 60Hz
AIEE Comite Report	2.330	Dengan tegangan 21 volt tegangan ke tangan $I_k = 9\text{mA}$
	1.130	Tangan ke kaki

	1.680	Tangan ke tangan dengan arus searah
	800	Tangan ke kaki dengan 50 Hz
Laurent	3.000	0

Berdasarkan hasil penyelidikan di atas untuk pendekatan diambil harga tahanan tubuh manusia sebesar 1000 Ohm.

2. *Macam-macam arus yang melalui tubuh manusia*

Kemampuan tubuh manusia terbatas terhadap besarnya arus yang mengalir didalamnya. Tetapi ketentuan yang pasti mengenai berapa besar dan lamanya arus yang masih dapat ditahan oleh tubuh manusia sampai batas yang belum membahayakan sukar untuk ditetapkan. Dalam hal ini telah banyak diselidiki oleh para ahli dengan berbagai macam percobaan baik dengan tubuh manusia sendiri maupun dengan menggunakan binatang tertentu. Dalam batas-batas tertentu dimana besarnya arus belum berbahaya terhadap organ tubuh manusia telah diadakan berbagai percobaan terhadap orang sukarelawan yang menghasilkan batas-batas besarnya arus dan pengaruhnya terhadap manusia yang berbadan sehat. Batas-batas arus tersebut dibagi sebagai berikut:

- Arus mulai terasa (*Perception current*).
- Arus mempengaruhi otot (*Let go current*).
- Arus mengakibatkan pingsan atau mati (*Fibrillating current*).
- Arus reaksi (*Reaction current*).

1. Arus Persepsi

Bila orang memegang penghantar yang diberi tegangan mulai dari harga nol dan dinaikkan sedikit demi sedikit, arus listrik yang melalui tubuh manusia 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 panas pada telapak tangan.

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

- a. Untuk laki-laki : 1.1 mA.
- b. Untuk perempuan : 0.7 mA.

2. Arus Mempengaruhi Otot

Bila tegangan yang menyebabkan terjadinya tingkat arus persepsi dinaikkan lagi maka manusia 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 orang laki-laki dan 28 orang perempuan dan diperoleh angka rata-rata dari arus yang mempengaruhi otot sebagai berikut:

- a. Untuk laki-laki : 16 mA.
- b. Untuk perempuan : 10.5 mA.

Berdasarkan penyelidikan ini telah ditetapkan batas arus maksimal di mana manusia masih dapat dengan segera melepaskan konduktor bila terkena arus listrik sebagai berikut:

- a. Untuk laki-laki : 9 mA.
- b. Untuk perempuan : 6 mA.

3. Arus Fibrilasi

Apabila arus yang melewati tubuh manusia lebih besar dari yang mempengaruhi otot dapat mengakibatkan manusia 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 manusia 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 kira-kira sama dengan manusia. Dari percobaan tersebut

Dalziel menarik kesimpulan bahwa 99,5% dari semua manusia yang massanya lebih kurang 50 kg masih dapat bertahan terhadap besar arus dan waktu yang ditentukan oleh persamaan sebagai berikut:

$$I_k^2 t = K \text{ atau } I_k = \frac{k}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

$$k = \sqrt{K}$$

K = 0,0135 untuk manusia dengan massa 50 kg.

= 0,0246 untuk manusia dengan massa 70 kg.

Maka:

$$k_{50\text{kg}} = 0,116 \text{ Ampere.}$$

$$k_{70\text{kg}} = 0,157 \text{ Ampere.}$$

Jadi:

$$I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ untuk manusia bermassa 50 kg}$$

$$I_k = \frac{0,157}{\sqrt{t}} \text{ untuk manusia bermassa 70 kg}$$

Dimana:

I_k = Besarnya arus lewat tubuh manusia (ampere).

t = Lama gangguan tanah yang dirasakan manusia (detik).

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 terkejutnya orang dapat jatuh dari tangga, melemparkan peralatan yang sedang dipegang yang dapat mengenai bagian-bagian instalasi bertegangan tinggi sehingga terjadi kecelakaan lebih fatal.

Penyelidikan yang terperinci telah dikemukakan oleh DR. Hans Prinz di mana batasan-batasan arus tersebut disusun menurut Tabel 2.5:

Tabel 2.5 Batasan-Batasan Arus dan Pengaruhnya Terhadap Manusia

Besar Arus	Pengaruh pada tubuh manusia
0-0,9 mA	Belum dirasakan pengaruhnya, tidak menimbulkan reaksi apa-apa
0 – 1,2 mA	Baru terasa adanya arus listrik, tetapi tidak menimbulkan akibat kejang, kontraksi atau kehilangan control
1,2 – 1,6 mA	Mulai terasa seakan-akan ada yang merayap di dalam tangan
1,6 – 6 mA	Tangan sampai ke siku merasa kesemutan
6,0 – 8,0 mA	Tangan mulai kaku, rasa kesemutan makin bertambah
13 – 15 mA	Rasa sakit tidak tertahankan, penghantar masih dapat melepaskan dengan gaya yang besar sekali
15 – 20 mA	Otot tidak sanggup lagi melepaskan penghantar
20 – 50 mA	Dapat mengakibatkan kerusakan pada tubuh manusia
50 – 100 mA	Batas arus yang dapat menyebabkan kematian

2.3 Kerangka Pemikiran

Ada beberapa metode yang digunakan dalam penelitian ini. Metode observasi dilakukan dengan pengamatan secara langsung pada objek yang diteliti. Dengan melakukan pengumpulan data dan metode wawancara yang akan dilakukan tanya jawab kepada staf operasi atau pembimbing di lokasi penelitian GIS Pulogadung mengenai masalah yang akan diteliti. Untuk memperkuat data dapat dilakukan metode kepustakaan dengan menambah masukan dan informasi literatur dari berbagai macam sumber. Adapun kerangka kerja penelitian yang digunakan sebagai berikut:



Gambar 2.8 Kerangka Pemikiran

Berdasarkan kerangka pemikiran yang telah digambarkan di atas, maka dapat diuraikan pembahasan masing-masing tahap dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pencarian landasan-landasan teori yang diperoleh dari berbagai buku dan jurnal untuk melengkapi konsep dan teori yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan sehingga memiliki landasan dan keilmuan yang baik dan sesuai.

2. Observasi Lapangan

Pada tahap ini dilakukan pengamatan secara langsung di lapangan tempat peneliti melakukan penelitian, dalam hal ini tempat penelitian akan dilakukan di GIS Pulogadung.

3. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan proses pengumpulan data dengan metode wawancara dan observasi untuk melakukan pengamatan dan analisa terhadap

objek penelitian sehingga mendapatkan data dan informasi yang dibutuhkan oleh peneliti.

4. Analisis Sistem

Pada tahap ini peneliti telah memperoleh data-data yang dibutuhkan dalam penelitian yang mana kemudian data-data tersebut akan diolah, dianalisa dan dievaluasi untuk mendapatkan hasil penelitian yang sesuai kebutuhan.

5. Pembuatan Laporan

Pada tahapan ini dilakukan pembuatan laporan yang disusun berdasarkan hasil penelitian dengan menggunakan teknik pengumpulan data primer dan sekunder sehingga menjadi laporan penelitian yang dapat memberikan gambaran penelitian secara utuh.