

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penelitian tugas akhir ini penulis memiliki beberapa referensi yang dapat dijadikan pendukung dalam menyusun tugas akhir ini diantaranya yaitu:

1. Abrar Tanjung, meneliti tentang sistem pentanahan Gardu Induk Bagan Batu dengan diperoleh tegangan sentuh senilai 186,7 volt, tegangan langkah senilai 209,6 volt dan batang pentanahan dengan jumlah 51 batang dengan kedalaman 3,5 meter
2. Yoga Septria, meneliti tentang tegangan sentuh dan tegangan langkah di Gardu Induk Kota Baru memperoleh tegangan sentuh sebesar 262 volt dan tegangan langkah sebesar 223 volt
3. Hans Tumaliang (2018), menganalisa sistem pentanahan Gardu Induk Teling dengan konstiksi *Grid* yang menghasilkan hambatan tanah 0,47 Ω dalam keadaan *grid* tanpa batang pentanahan dan 0,18 Ω ketika *grid* dipasang dengan batang pentanahan.
4. Wiratama Bimby Andesito (2018), membahas tentang keamanan sistem pentanahan Gardu Induk 150 kv Ngawi dengan hasil hambatan pentanahan $\leq 1\Omega$ dengan tegangan langkah yang diizinkan sebesar 1430 volt serta tegangan langkah yang diizinkan sebesar 4940 dan tegangan pindah senilai 3833.5 volt.
5. Hangga Karuna (2014), membahas tentang keamanan sistem pentanahan Gardu Induk Jajar dengan hambatan tanah sebesar 0,3 Ω memperoleh tegangan sentuh sebesar 902 volt dan tegangan langkah sebesar 3116 volt dengan tegangan pindah sebesar 6058,5 volt.
6. Anang Sakrani (2018), membandingkan tentang tegangan sentuh dan tegangan langkah pada gardu induk 150 kv Bantul dengan standar yang dibuat IEEE tentang keamanan pentanahan pada gardu induk AC dan mendapatkan kesimpulan bahwa tegangan langkah dan tegangan sentuh

pada Gardu Induk 150 kv Bantul telah memenuhi nilai standar yang diperbolehkan.

2.2 Gardu Induk

Gardu induk merupakan suatu sub sistem yang ada pada sistem transmisi listrik yang terdiri dari peralatan listrik yang berfungsi sebagai pusat penyaluran yang menghubungkan sistem transmisi tegangan tinggi dengan gardu-gardu distribusi. Adapun utama dari gardu induk adalah sebagai berikut:

1. Menyalurkan tegangan dengan cara mentransformasikan tegangan tinggi ke tegangan lebih rendah atau dari tegangan rendah ke tegangan lebih tinggi.
2. Sebagai sarana pengukur, pengawas operasi dan pengaman dari sistem tenaga listrik.
3. Pengatur pelayanan beban ke gardu induk lain atau ke gardu distribusi yang tegangannya telah diturunkan oleh penyulang tegangan menengah di gardu induk tersebut.
4. Sebagai sarana komunikasi untuk internal PLN ketika terjadi masalah dalam proses penyaluran tenaga listrik.

Berdasarkan tempat pemasangan peralatan gardu induk dapat dibagi menjadi 2 yaitu:

1. Gardu Induk Pasangan Luar

Gardu induk pasangan luar merupakan gardu induk yang sebagian besar peralatannya ditempatkan diluar gedung, kecuali sistem proteksi, sistem kontrol serta komponen lainnya yang ada di dalam gedung. Gardu induk jenis ini biasa disebut dengan gardu induk konvensional.

2. Gardu Induk Pasangan Dalam

Gardu induk pasangan dalam merupakan gardu induk yang hampir semua komponennya berada di dalam gedung kecuali transformator daya. Gardu induk ini biasa disebut juga dengan *Gas Insulated Substation (GIS)*. Gardu jenis ini biasa digunakan pada daerah perkotaan yang biasanya sulit untuk

mendapatkan lahan yang luas karena GIS hanya memerlukan $\pm 6\%$ dari luas gardu induk konvensional.

2.3 Sistem Pentanahan

Gardu induk merupakan sistem dalam penyaluran tenaga listrik yang memiliki tegangan yang sangat tinggi sehingga resiko terjadinya gangguanpun akan terjadi. Oleh karena itu agar mampu memberikan keamanan yang baik untuk peralatan yang ada di gardu induk tersebut serta keamanan operator yang bekerja disana maka diperlukan sistem pentanahan yang sesuai dengan standar yang berlaku. terdapat beberapa standar yang dapat dijadikan acuan dalam perancangan sistem pentanahan diantaranya PUIL (Peraturan Umum Instalasi Listrik) yang telah dikelarkan oleh pemerintah dan standar nomor 80 yang dikeluarkan oleh IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineer*) mengenai panduan keamanan dalam gardu induk AC.

Sistem pentanahan merupakan salah satu dasar dalam sistem proteksi karena sistem pentanahan dapat digunakan untuk sistem penangkal petir, pentanahan peralatan gardu induk, pentanahan netral dalam penyaluran tenaga listrik, dan pentanahan untuk suatu peralatan elektronik dan komunikasi yang sangat memerlukan sistem pentanahan. Tidak jarang orang umum/ awam maupun seorang teknisi masih ada kekurangan dalam memprediksikan nilai dari suatu hambatan pentanahan. Hal penting yang perlu diperhatikan dalam membuat sistem pentanahan adalah hambatan sistem yang dihasilkan suatu sistem pentanahan tersebut. Pengukuran hambatan tanah biasanya dilakukan dengan alat *earth tester* yang bekerja dengan cara menyalurkn arus searah ke tanah, sedang kenyataan sistem pentahanan yang telah dibuat tidak pernah dialuri oleh arus searah. Arus yang biasanya mengalir pada sistem pentanahan berupa sinusoidal (AC) atau bahkan berupa impuls (petir) dengan frekuensi yang tinggi berupa arus yang berubah-ubah dalam waktu sangat tidak menentu.

Berikut merupakan kriteria dari sistem pentanahan yang dirancang dengan baik dan benar:

1. Dapat mengamankan arus bocor yang diakibatkan oleh kesalahan isolasi.
2. Menggunakan bahan yang tahan terhadap korosi akibat kondisi tanah, sehingga sistem pentanahan yang telah dirancang dapat berumur panjang.
3. Sistem pentanahan harus menghasilkan nilai resistansi tanah agar dapat mengamankan manusia dan peralatan.
4. Mudah dalam hal perawatan maupun perbaikan.

Sistem pentanahan dapat dikatakan baik jika nilai hambatannya semakin kecil karena dapat menyalurkan arus gangguan dengan lancar sehingga arus gangguan tersebut tidak meramambat menuju sistem kelistrikan. Dalam beberapa standar yang telah disepakati nilai hambatan pentanahan untuk saluran tranmisi dan salurna komunikasi tidak boleh memiliki nilai hambatan pentanahan melebihi 1Ω , sedangkan untuk bangunan atau gedung nilai hambatan pentanahan yang diperolehkan tidak boleh melebihi 5Ω .

2.4 Hambatan Jenis Tanah

Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai hambatan pentanahan di suatu lokasi diantaranya yaitu: sifat geologi tanah, unsur kimia, kandungan air dalam tanah, suhu tanah, dan perubahan iklim dapat mengakibatkan perubahan hambatan pentanahan tersebut.

2.4.1 Sifat Geologis

Sifat geologis tanah merupakan faktor penting yang dapat mempengaruhi hambatan jenis tanah. Kesulitan yang biasa terjadi ketika ingin mengetahui nilai hambatan jenis tanah adalah karena pada kenyataan dilapangan kondisi tanah tidak hanya terdiri dari 1 jenis baik secara vertikal maupun horizontal. Untuk mengetahui nilai pasti dari hambatan pentanahan suatu tempat diperlukan pengukuran langsung pada lokasi tersebut secara langsung dengan memperbanyak titik-titik pengukuran. Dalam PUIL 2011 terdapat enam jenis

tanah yang biasanya dijumpai, masing-masing tanah dari enam tipe tersebut dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hambatan Jenis Tanah PUIL 2011

Jenis Tanah	Hambatan Jenis (Ω -m)
Tanah rawa	30
Tanah liat dan Ladang	100
Pasir basah	200
Kerikil basah	500
Pasir dan kerikil kering	1000
Tanah berbatu	3000

2.4.2 Unsur Kimia

Unsur kimia dalam tanah terutama sejumlah zat organik maupun anorganik yang dapat larut perlu untuk diperhatikan pula. Hambatan jenis tanah yang tinggi biasanya dapat dijumpai pada daerah yang memiliki curah hujan tinggi, hal ini disebabkan oleh garam yang terkandung pada lapisan tanah bagian atas larut oleh hujan. Agar memperoleh sistem pentanahan yang efektif pada daerah yang seperti ini dapat dilakukan dengan menanamkan elektroda lebih dalam hingga terdapat unsur garam pada lapisan tersebut atau setidaknya tidak berpengaruh oleh hujan yang turun. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai tahanan tanah yang lebih rendah dapat dilakukan dengan penggaraman pada tanah disekitar elektroda, namun cara ini harus dilakukan secara berkala.

2.4.3 Kandungan Air

Kandungan air didalam tanah sangat berpengaruh terhadap nilai hambatan jenis tanah (ρ) terutama tanah yang memiliki kandungan air hingga 20%. Salah satu percobaan laboratorium menyebutkan bahwa tanah merah yang mengalami penurunan kandungan air tanah dari 20% ke 10% dapat menyebabkan hambatan jenis tanah naik hingga tiga puluh kali lipat. Nilai

hambatan tanah yang memiliki kandungan air melebihi 20% tidak akan berpengaruh banyak. Supaya nilai hambatan tanah tidak berubah-ubah ketika terjadi perubahan iklim maka sebaiknya elektroda pentanahan ditanah pada kedalaman tertentu hingga tercapai kandungan air yang konstan pada tanah.

Kandungan air dalam tanah dapat mempengaruhi daya hantar listrik pada tanah semakin besar karena biasanya arus listrik yang mengalir melalui tanah diakibatkan oleh proses elektrolisa. Dengan demikian hambatan jenis tanah akan dipengaruhi pula oleh besar kecilnya konsentrasi air tanah atau kelembaban tanah, sehingga semakin besar konduktifitas maka nilai hambatan tanahnya semakin kecil.

Nilai dari hambatan jenis tanah sangat berpengaruh terhadap hambatan pentanahan yang dihasilkan oleh elektroda. Satuan hambatan jenis tanah adalah Ohm-meter. Untuk mengetahui hambatan jenis tanah biasanya menggunakan metode wenner dengan menggunakan empat elektroda yang ditanam dengan jarak yang sama kemudian membandingkan tegangan pada dua elektroda terdalam dengan arus yang mengalir pada dua elektroda terluar sehingga mendapatkan nilai hambatan tanah. Hambatan pentanahan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

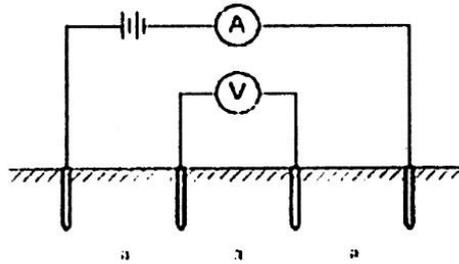
$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

dengan: ρ = Hambatan jenis rata-rata tanah (ohm-meter)

a = Jarak antara batang elektroda (m)

b = Kedalaman batang elektroda (m)

R = hambatan tanah terukur (ohm)



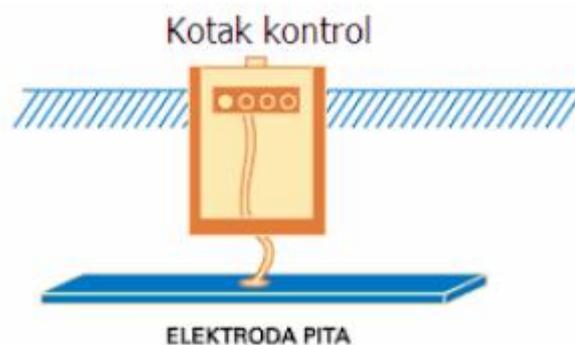
Gambar 2.1 Metode Wenner

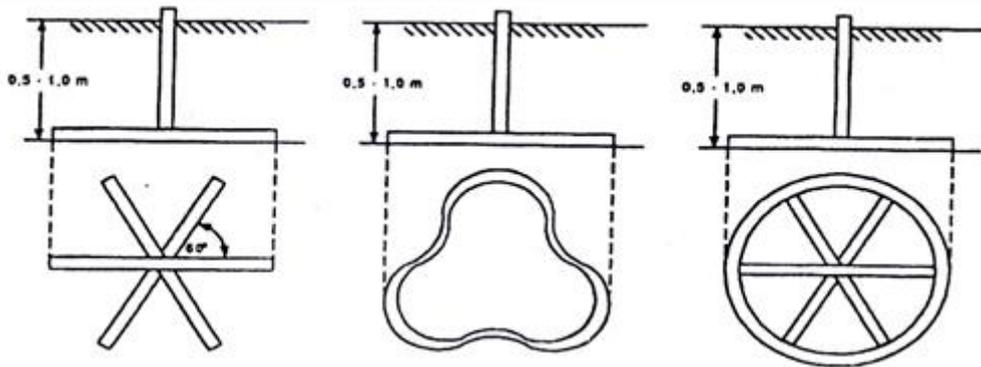
2.5 Jenis Elektroda Pentanahan

Elektroda pentanahan adalah suatu konduktor/penghantar yang ditanam kedalam tanah dengan tujuan untuk mengalirkan arus dan tegangan yang bocor menuju ke tanah. Terdapat 3 jenis elektroda pembedaan yang sering digunakan adalah sebagai berikut:

1. Elektroda Pita.

Sesuai dengan namanya elektroda pita adalah elektroda yang memiliki bentuk seperti pita atau lempengan tipis. Elektroda jenis ini biasanya ditanam secara mendatar dengan kedalaman 0.5 – 1 meter dari permukaan tanah. Berbeda dengan elektroda jenis batang elektroda pita akan mengalami gangguan apabila ditanam pada lapisan tanah yang berbatu. Besarnya resistansi pada elektroda bergantung dengan bentuk konfigurasi yang digunakan seperti melingkar, radial atau kombinasi antar keduanya.





Gambar 2.2 Elektroda Pita

Berikut adalah rumus yang digunakan untuk mencari nilai hambatan elektroda pita:

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

Keterangan: R = Hambatan kawat (Ohm)

ρ = Hambatan Jenis Tanah (Ohm-meter)

L = Total Panjang Elektroda (meter)

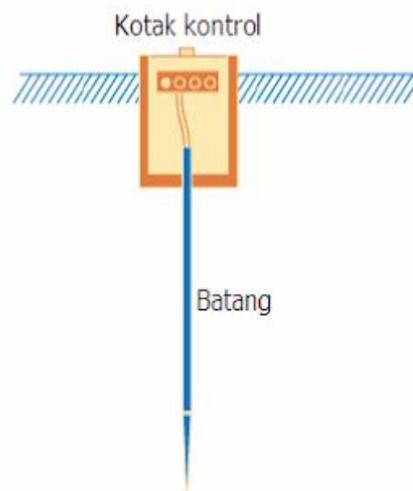
D = Diameter Elektroda (meter)

W = Luas yang dijangkau *Grid* (meter²)

Z = Kedalaman Penanaman (meter)

2. Elektroda Batang (Rod)

Elektroda batang merupakan elektroda yang terbuat dari pipa atau besi baja yang ditanam ke dalam tanah dengan posisi vertikal. Karena ditanam secara vertikal maka elektroda ini tidak memerlukan lahan yang luas. Elektroda jenis ini sering digunakan pada gardu-gardu induk. Hambatan yang dihasilkan oleh elektroda batang bergantung oleh panjang batang tersebut. Biasanya elektroda jenis ini ditanam dalam kedalaman 1 – 6 meter.



Gambar 2.3 Elektroda Batang

Berikut adalah rumus yang digunakan untuk mencari nilai resistant elektroda batang:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{\sqrt{A}} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Keterangan: R = Hambatan kawat (Ohm)

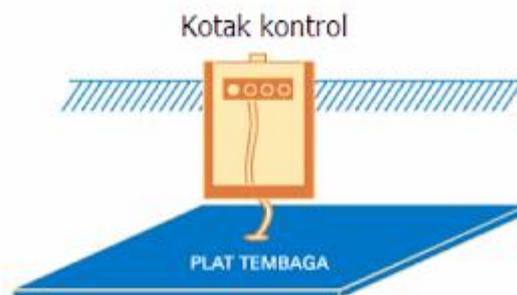
ρ = Hambatan Janis Tanah (Ohm-meter)

L = Total Panjang Elektroda (meter)

A = Diameter Elektroda (meter)

3. Elektoda Plat

Elektroda plat adalah elektroda yang terbuat dari pelat logam utuh maupun berlubang atau dari kawat kasa. Kelebihan dari elektroda plat adalah dapat menghasilkan nilai hambatan yang lebih kecil dimana hal tersebut sulit didapat dengan menggunakan elektroda jenis lain. Selain memiliki kelebihan tersebut elektroda plat juga memiliki kelemahan yaitu diperlukanya lahan yang lebih besar dibandingkan elektroda jenis pita dan batang.



Gambar 2.4 Elektroda Plat

Rumus untuk nilai hambatan pentanahan elektroda plat adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{8W}{\sqrt{0,5W + T}} \right) - 1 \quad (2.4)$$

Keterangan: R = Hambatan kawat (Ohm)

ρ = Hambatan Janis Tanah (Ohm-meter)

L = Total Panjang Elektroda (meter)

W = Lebar Plat (meter)

T = Tebal Plat (meter)

Ukuran elektroda pentanahan akan menentukan besar hambatan pentanahan. Berikut merupakan tabel perbandingan hambatan pentanaha yang dihasilkan dari masing-masing jenis elektroda dengan ukuran yang berbeda-beda.

Tabel 2.2 Perbandingan Hambatan Pentanahan

Jenis Elektroda	Ukuran	Hambatan Pentanahan (Ω)
Pita	10 m	20
	25 m	10
	50 m	5
	100 m	3
Batang	1 m	70

Jenis Elektroda	Ukuran	Hambatan Pentanahan (Ω)
	2 m	40
	3 m	30
	5 m	20
Plat vertikal dengan sisi atas \pm 1m di bawah permukaan tanah	0,5 x 1 m ²	35
	1 x 1 m ²	25

2.6 Konduktor Pentanahan

Pemilihan jenis konduktor pentanahan yang tepat sangat diperlukan agar menjaga konstannya hambatan tanah untuk beberapa tahun kedepan. Terutama kehambatan konduktor terhadap korosi yang bisa saja terjadi pada jenis tanah tertentu. Konduktor yang digunakan untuk pentanahan harus memenuhi beberapa persyaratan antara lain:

- Memiliki konduktifitas yang besar sehingga tidak menyebabkan beda potensial yang terlalu besar.
- Memiliki bahan yang kuat terutama ketika konduktor tersebut digunakan pada daerah yang rawan terhadap kerusakan fisik.
- Memiliki titik lebur tinggi sehingga tidak rusak ketika walaupun konduktor tersebut akan dialiri arus gangguan sangat besar dalam waktu yang lama.
- Berbahan anti karat karena karat dapat menyebabkan konduktifitas dari konduktor pentanahan berkurang.

Menurut standar IEEE std. 80 *Guide for Safety in AC Substation* untuk mencari kapasitas arus pada elektroda tembaga dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.5) di bawah.

$$A = I \sqrt{\frac{33t}{\log_{10} \left(\frac{Tm - Ta}{234 + Ta} + 1 \right)}} \quad (2.5)$$

Keterangan:

A : Luas Penampang Konduktor (mm^2)

I : Arus Gangguan (A)

t : Durasi Gangguan (detik)

T_m : Suhu Maksimum Konduktor yang Diperbolehkan ($^{\circ}\text{C}$)

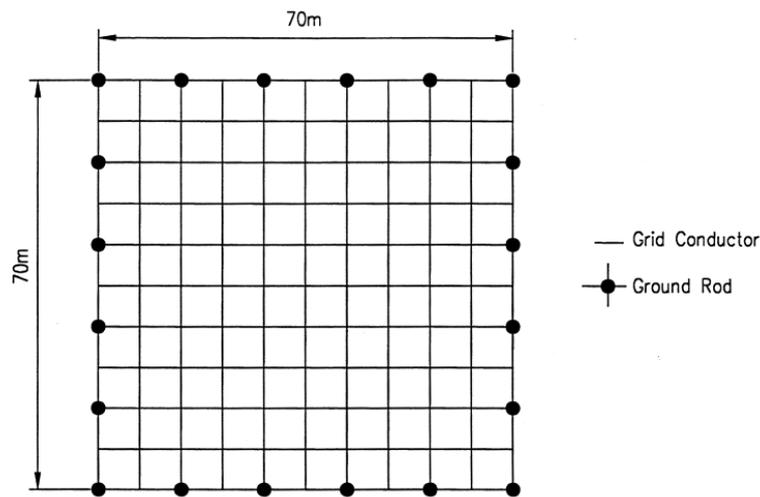
T_a : Suhu Sekeliling Hambatan Maksimum ($^{\circ}\text{C}$)

Dengan menggunakan persamaan (2.5) di atas maka dapat diperkirakan ukuran penampang minimum konduktor yang baik yang selanjutnya akan digunakan pada kisi-kisi pentanahan.

2.7 Sistem Pentanahan pada Gardu Induk

Biasanya gardu menggunakan pentanahan dengan sistem *mesh* atau *grid* karena sistem pentanahan jenis *grid* memiliki beberapa keuntungan di bandingkan dengan sistem pembumian yang lainnya. Salah satu keuntungan yang didapat dari sistem pentanahan *grid* adalah tegangan dan arus gangguan yang terjadi pada sistem pentanahan tersebut dapat tersebar lebih merata sehingga dapat menghasilkan nilai hambatan pentanahan yang lebih kecil.

Sistem pentanahan *grid* dapat dibuat dengan cara menamamkan batang-batang elektroda dalam kedalaman tertentu. Selanjutnya batang-batang elektroda tersebut dihubungkan pada setiap ujung satu dengan yang lainnya sehingga berbentuk seperti jaring.



Gambar 2.5 Grid

Persebaran tegangan gangguan yang terjadi bergantung pada jarak antar elektroda, semakin jauh jarak antar elektroda maka penyaluran tegangan gangguan semakin tidak rata dan jika semakin dekat jarak antar elektroda maka penyaluran tegangan gangguan akan semakin merata.

2.8 Batasan Arus yang Dapat Diterima Oleh Tubuh

Adanya gangguan tanah dapat mengakibatkan beda potensial di permukaan tanah, sehingga arus gangguan dapat mengalir melalui tubuh manusia dapat membahayakan manusia itu sendiri. Efek dari arus listrik yang melewati bagian-bagian vital tubuh manusia bergantung pada durasi, besar, dan frekuensi dari arus tersebut. Bagian dari tubuh manusia paling berbahaya jika terkena paparan semacam ini adalah jantung, kondisi ini biasa disebut sebagai fibrilasi ventrikel, yang mengakibatkan terhambatnya sirkulasi darah dengan cepat. Tabel 2.3 di bawah merupakan akibat yang dihasilkan karena tubuh manusia dialiri arus.

Tabel 2.3 Pengaruh pada Manusia

Besar Arus	Pengaruh Pada Manusia
0 – 0,9 mA	Tidak berpengaruh dan menimbulkan reaksi.
0,9 – 1,2 mA	Merasakan adanya arus listrik tetapi tidak mengakibatkan kejang atau kehilangan kontrol.
1,2 – 1,6 mA	Merasakan ada aliran listrik yang mengalir di tangan.
1,6 – 6,0 mA	Mulai kesemutan pada bagian tangan sampai siku.
6,0 – 8,0 mA	Merasa kesemutan dan tangan menjadi kaku.
13 – 15 mA	Rasa sakit tak tertahankan.
15 – 20 mA	Mulai lemas dan tidak dapat melepaskan konduktor.
20 – 50 mA	Bisa merusak organ pada tubuh .
50 – 100 mA	Mengakibatkan kematian.

2.9 Arus fibrilasi

Apabila arus yang melewati tubuh manusia lebih besar daripada batas arus yang berpengaruh otot maka hal tersebut mengakibatkan pingsan atau bahkan sampai mati. Hal itu terjadi karena arus listrik tersebut mempengaruhi jantung, sehingga jantung tersebut berhenti bekerja dan peredaran darah tidak jalan sehingga dapat menyebabkan kematian. Kejadian itu disebut dengan *Ventricular Fibrillation*.

Percobaan yang telah dilakukan oleh Daziel menyatakan bahwa 99,5% dari semua orang yang berat badannya lebih kurang 50 kg masih dapat bertahan terhadap arus listrik dengan waktu yang bisa ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (2.6)$$

$$k = \sqrt{S_B} \quad (2.7)$$

Keterangan: I_B = Besaran arus yang melewati tubuh manusia (A)
 t = waktu arus melewati tubuh manusia (detik)
 S_B = konstanta empiris yang terkait dengan kejutan listrik yang dapat ditoleransi oleh beberapa sampel populasi

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Danziel 99,5% manusia dengan berat badan 50 Kg dapat mentoleransi kejutan listrik dengan menghasilkan konstanta $S_B = 0,0135$ dan $S_B = 0,0246$ untuk manusia dengan berat badan 70 Kg. Sehingga dengan memasukkan nilai k pada persamaan (2.6) maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\text{untuk berat badan 50 Kg} \quad I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2.8)$$

Atau

$$\text{untuk berat badan 70 Kg} \quad I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (2.9)$$

2.10 Hambatan Tubuh Manusia

Tubuh manusia merupakan suatu penghantar, sehingga hukum ohm juga berlaku terhadap tubuh manusia. besarnya arus yang melewati tubuh manusia bergantung dengan besarnya tegangan sentuh dan impedansi yang dihasilkan oleh tubuh manusia itu sendiri sehingga dapat ditulis persamaan sebagai berikut:

$$I = \frac{E}{Z} \quad (2.10)$$

Dimana : I = Arus yang mengalir (A)

E = Tegangan sentuh (V)

Z = Total impedansi pada tubuh manusia (Ω)

Hambatan tubuh manusia berada antara kaki dan tangan, yaitu dari satu kaki ke kaki yang lain atau satu tangan ke kedua kaki. Hambatan dari jaringan tubuh bagian dalam, tidak termasuk kulit, kira - kira 300 Ω , sedangkan hambatan tubuh beserta kulit adalah antara 500 - 3000 Ω . Hambatan tubuh manusia dapat berkurang karena kulit yang rusak saat titik terhubungan dengan suatu benda. Tangan yang basah dapat membuat hambatan pada tangann tersebut sangat kecil. Hambatan yang berasal dari kaki nilainya tidak menentu, namun bisa sangat rendah untuk kulit yang basah. Sehingga dapat dikatakan bahwa :

1. Hambatan hubungan tangan dan kaki dianggap sama dengan nol.
2. Hambatan sarung tangan dan sepatu diabaikan atau sama dengan nol.
3. Hambatan tubuh manusia diambil sebesar 1000 Ω , dari tangan kedua kaki dan juga dari tangan ke tangan, atau dari kaki ke kaki lain: $R_B = 1000 \Omega$

Berikut merupakan hasil pengukuran hambatan tubuh manusia yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti dapat dilihat pada tabel 2.5 di bawah.

Tabel 2.4 Hambatan Tubuh Manusia

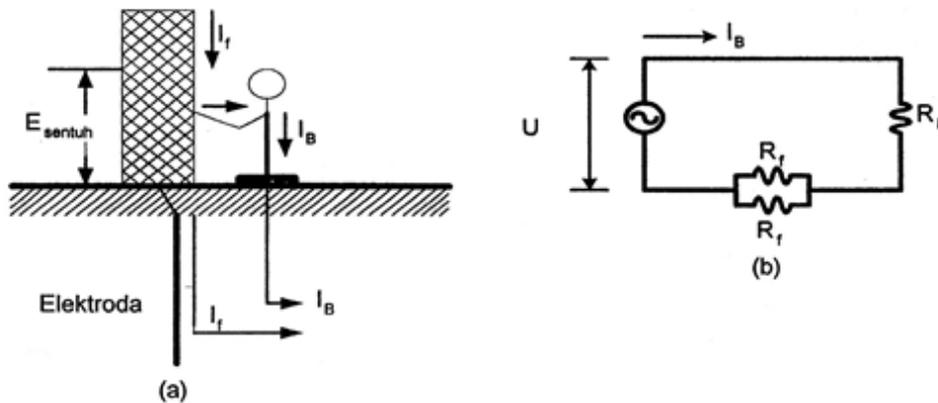
Peneliti	Hambatan (Ω)	Keterangan
Dalziel	500	Tegangan 60 cps
Laurent	3000	
AIEE Committee Report 1958	2330 1230 1680 800	Tegangan 21 Volt Tangan ke kaki Tangan ke tangan Tangan ke kaki 50 cps

Perbedaan Impedansi pada tubuh manusia dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya:

1. Kelembaban kulit, kelembaban kulit yang diakibatkan oleh keringat atau basah karena air dapat mengakibatkan impedansi tubuh manusia semakin kecil.
2. Keadaan otot, semakin banyak otot yang dimiliki maka impedansi yang dihasilkan akan semakin rendah. biasanya otot seorang pria memiliki otot yang lebih banyak dibanding wanita sehingga impedansi tubuh pria lebih rendah dari wanita.
3. Berat badan, berat badan yang besar atau orang gemuk memiliki permukaan yang besar dan kepadatan sel yang tinggi sehingga impedansi yang dihasilkan rendah.

2.11 Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah tegangan yang muncul pada bagian alat/instalasi yang seharusnya tidak dialiri oleh arus listrik. Hal ini disebabkan oleh kegagalan isolasi pada alat/instalasi tersebut. Jika alat/instalasi tersebut tidak memiliki sistem pentanahan maka tegangan sentuh yang ditimbulkan memiliki besar yang sama dengan tegangan sistem alat/instalasi tersebut. Hal tersebut tentunya sangat membahayakan keselamatan manusia yang mengoperasikan atau berada pada area tersebut. Keadaan tersebut dapat terus terjadi jika alat pengaman arus lebih (*over current relay*) tidak memutuskan rangkaian.



Gambar 2.6 a. Arus mengalir pada tegangan sentuh

Gambar 2.6 b. Rangkaian Ekuivalen tegangan sentuh

Bedasarkan rangkaian pada gambar 2.6 b di atas dapat diketahui besarnya tegangan sentuh adalah:

$$E_{sentuh} = I_B \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) \quad (2.11)$$

Dengan : E_{sentuh} : Tegangan sentuh (V)

I_B : Arus yang melewati tubuh (A)

R_B : Hambatan tubuh (Ω)

R_f : Hambatan kontak kebumian (Ω)

Kita ambil permisalan hambatan tubuh manusia R_B adalah 1000Ω dan hambatan kontak kaki dengan permukaan bumi didekati dengan nilai $R_f = 3$ sehingga rumus mencari tegangan sentuh dapat disederhanakan menjadi:

$$E_{sentuh} = I_B(R_B + 1,5\rho_s) \quad (2.12)$$

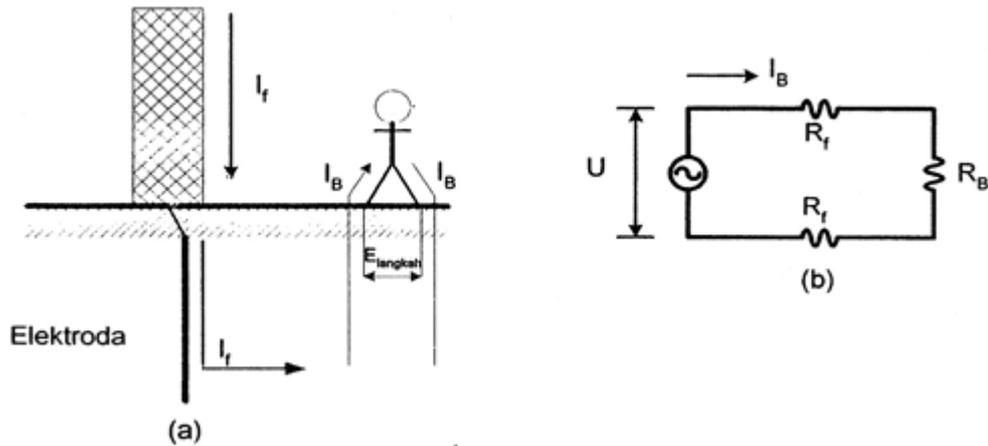
Tabel 2.5 di bawah merupakan batas tegangan sentuh yang diizinkan dan lama gangguanya menurut standar IEEE.

Tabel 2.5 Tegangan Sentuh

Tegangan Sentuh (Volt)	Lama Gangguan (detik)
1980	0,1
1400	0,2
1140	0,3
990	0,4
890	0,5
626	1,0
443	2,0
363	3,0

2.12 Tegangan Langkah

Tegangan langkah merupakan tegangan yang muncul di antara kedua kaki manusia ketika berdiri di atas permukaan tanah yang sedang dialiri arus gangguan. Hal ini terjadi karena arus gangguan menyebar seperti gelombang yang memiliki kekuatan berbeda disetiap gelombangnya sehingga ketika seseorang melangkah kedua kaki tersebut dapat menimbulkan beda potensial.



Gambar 2.7 a. Arus mengalir pada tegangan langkah

Gambar 2.7 b. Rangkaian Ekuivalen tegangan langkah

$$E_{langkah} = I_B(R_B + 2R_f\rho_s) \quad (2.13)$$

Dengan : $E_{langkah}$: Tegangan langkah (V)

I_B : Arus yang melewati tubuh (A)

R_B : Resistans tubuh (Ω)

R_f : Resistans kontak kaki (Ω)

Dengan memasukkan nilai R_f maka persamaan untuk mencari tegangan langkah akan menjadi:

$$E_{langkah} = I_B(R_B + 6\rho_s) \quad (2.14)$$

Tabel 2.6 di bawah merupakan tegangan langkah yang diizinkan dan lama gangguanya menurut standar IEEE.

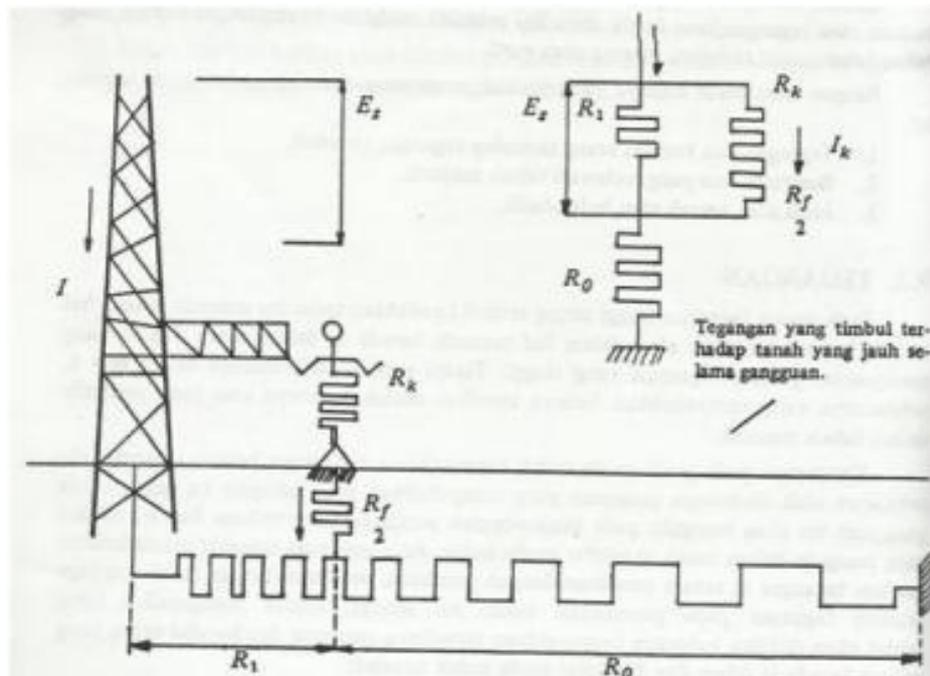
Tabel 2.6 Tegangan Langkah

Tegangan Langkah (volt)	Lama Gangguan (detik)
7,000	0,1
4,950	0,2
4040	0,3

Tegangan Langkah (volt)	Lama Gangguan (detik)
3500	0,4
3140	0,5
2216	1,0
1560	2,0
1280	3,0

2.13 Tegangan Pindah

Tegangan pindah merupakan hal khusus dari tegangan sentuh, dimana orang yang berdiri dan menyentuh konduktor di lokasi yang jauh dari area gardu induk namun konduktor tersebut diketanahkan pada area gardu induk. Hal ini juga bisa terjadi ketika seseorang di area gardu induk menyentuh konduktor yang diketanahkan jauh dari area gardu induk. Tegangan pindah ini biasanya disalurkan melalui saluran komunikasi, saluran pipa, kabel netral tegangan, dll. Tegangan pindah ini sangat sulit untuk dibatasi, salah satu cara untuk menghindari adanya tegangan pindah adalah dengan menggunakan isolator yang baik di berbagai jenis saluran.



Gambar 2.8 Tegangan pindah

$$E_{pindah} = I \times R_0 \quad (2.15)$$

Dimana :

$$R_0 = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (2.16)$$

Dengan : ρ = Hambatan Jenis Tanah ($\Omega.m$)

I = Arus gangguan (A)

r = Jari-jari ekuivalen dari luas gardu induk

L = Panjang total dari konduktor pentanahan.