



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gardu Induk

Gardu induk adalah suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik yang merupakan pusat beban yang diambil untuk menghubungkan sistem transmisi tegangan tinggi dengan saluran-saluran dan gardu-gardu distribusi. Adapun fungsi gardu induk sebagai berikut:



Gambar 2.1 Gardu Induk

1. Mentrasformasikan daya listrik, yaitu :
 - a. Untuk tegangan tinggi ke tegangan tinggi (150kV/70kV)



- b. Untuk tegangan tinggi ke tegangan yang menengah (150kV / 20kV, 70kV / 20kV)
 - c. Untuk tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi (500kV/150kV)
2. Untuk pengukuran, pengawasan operasi serta pengamanan dari sistem tenaga listrik
 3. Pengaturan pelayanan beban dari gardu induk–gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan ke gardu–gardu distribusi setelah melalui proses penurunan tegangan melalui penyulang–penyulang (feeder–feeder) tegangan menengah yang ada di gardu induk
 4. Untuk sarana telekomunikasi (pada umumnya untuk internal PLN), yang dikenal dengan istilah SCADA

2.2 Sistem Pentanahan

Salah satu pengamanan yang paling baik terhadap peralatan listrik dari gangguan arus lebih ataupun hubungan singkat yaitu, dengan cara pentanahan. Cara ini juga dapat melindungi manusia dari adanya bahaya-bahaya yang dapat mem akan korban. dengan menghubungkan bagian dari peralatan tersebut dengan sistem pentanahan. Pentanahan adalah penghubung suatu titik rangkaian listrik dengan bumi dengan cara tertentu, apabila suatu tindakan pengamanan atau perlindungan yang akan dilaksanakan Maka harus ada sistem pentanahan yang dirancang dengan benar, agar sistem pentanahan dapat bekerja efektif.

Yang dimaksud sistem pentanahan adalah sebagai berikut :

- a. Membuat jalur impedansi rendah ke tanah untuk pengamanan personil dan peralatan menggunakan rangkaian efektif.¹⁾

¹⁾ AS Pabla dan Abdul Hadi. 1991. Sistem Distribusi Daya Listrik. Penerbit Erlangga. Hal : 154



- b. Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat surja hubungan (surge currents).
- c. Menggunakan bahan tahan korosi terhadap bagian kondisi kimiawi tanah
- d. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam pemeliharaan.

2.3 Fungsi dan Tujuan Pentanahan

²⁾Fungsi pentanahan adalah untuk mengalirkan arus listrik kedalam tanah melalui suatu elektroda tanah yang ditanam di dalam tanah jika terjadi suatu gangguan. Arus listrik mengalir pada elektroda pentanahan akan mengakibatkan perbedaan tegangan antara elektroda pada suatu titik dengan suatu titik lain dipermukaan tanah. Bila perbedaan maksimum sepanjang permukaan tanah ternyata masih begitu besar, maka kondisi ini sangat tidak menguntungkan karena akan membahayakan personil yang sedang bekerja.

³⁾Tujuan pentanahan peralatan-peralatan listrik yang ditanahkan antara lain:

- a. Untuk keperluan proteksi bagi orang maupun sirkit-sirkit tenaga listrik beserta peralatan lainnya.
- b. Untuk memperkecil bahaya shock pada manusia maupun hewan serta memberikan jalan ke tanah untuk arus gangguan .
- c. Untuk menetralkan grounding tegangan yang terjadi pada permukaan tanah.

²⁾ Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.

Laporan skripsi. Hal : 5

³⁾ Ibid Hal : 7



2.4 Komponen Pentanahan

Komponen sistem pentanahan secara garis besar terdiri dari dua bagian, yaitu hantaran penghubung dan elektroda pentanahan.

2.4.1 Hantaran Penghubung

Seperti yang kita ketahui pada instalasi listrik suatu saluran penghantar yang menghubungkan titik kontak pada badan atau rangka peralatan listrik dengan elektroda bumi. Pada instalasi penangkal petir yaitu saluran penghantar yang menghubungkan titik kontak pada terminal pentanahan batang dengan elektroda bumi. Kalau generator atau transformator, yaitu menghubungkan titik netralnya dengan elektroda pentanahan.

2.4.2 Elektroda Pentanahan

⁴⁾Elektroda pentanahan adalah suatu penghantar yang ditanamkan ke dalam tanah dan membuat kontak langsung dengan tanah. Sedangkan menurut SNI 225-87/320.A.1, elektroda pentanahan adalah sebuah atau sekelompok penghantar yang mempunyai kontak yang erat dengan bumi dan mengentrai hubungan listrik dengan bumi. Elektroda pentanahan tertanam sedemikian rupa dalam tanah berupa pita logam, batang konduktor, pipa air minum hubungan atau kotak elektroda dengan bumi merupakan bagian yang dari tulang besi beton pada tiang pancang. Elektroda pentanahan hubungan atau kotak elektroda dengan bumi merupakan bagian yang langsung menyebarkan arus ke dalam bumi, hubungan atau kontak elektroda dengan bumi ini harus sebaik mungkin, tahan terhadap gangguan arus listrik, korosi maupun gangguan mekanik. Jadi yang diharapkan adalah hubungan listrik dengan

⁴⁾ Debby Agustiah. 2013. Evaluasi Elektroda Pentanahan Pada Sistem Distribusi. Laporan skripsi. Hal : 8

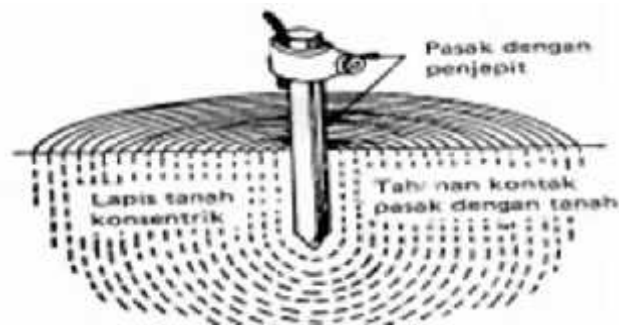


elektroda pentanahan yang biasa dipakai, diantaranya elektroda pentanahan pita dan elektroda batang. Sifat-Sifat dari sebuah sistem elektroda tanah. ⁵⁾Hambatan arus melewati sistem elektroda tanah tiga komponen, yaitu :

- a. Tahanan pasaknya sendiri dan sambungan-sambungannya.
- b. Tahanan kontak antara pasak dengan tanah sekitar.
- c. Tahanan tanah disekelilingnya.

Pasak-pasak tanah, batang-batang logam, struktur dan peralatan lain biasa digunakan untuk elektroda tanah. Elektroda-elektroda ini umumnya besar dan penampangnya sedemikian, sehingga tahananannya Dapat diabaikan terhadap tahanan keseluruhan sistem pentanahan. Tahanan antara elektroda dan tanah jauh lebih kecil dari yang biasanya diduga. Apabila elektroda bersih dari cat atau minyak, dan tanah dapat dipasak dengan kuat maka biro Standarisasi Nasional Amerika Serikat menyatakan bahwa tahanan kontak dapat diabaikan. Pasak dengan tahanan seragam yang ditanam ketanah akan menghantarkan arus kesemua jurusan. Jika ditinjau suatu elektroda yang ditanam di tanah yang terdiri atas bagian-bagian tanah dengan ketebalan yang sama seperti gambar berikut :

⁵⁾ AS Pabla dan Abdul Hadi. 1991. Sistem Distribusi Daya Listrik. Penerbit Erlangga. Hal : 158



Gambar 2.2 Komponen sistem pentanahan

Lapisan tanah terdekat dengan pasak sendirinya memiliki permukaan paling sempit, sehingga memberikan tahanan terbesar. Lapisan berikutnya, karena lebih luas, memberikan tahanan yang lebih kecil. Demikian seterusnya, sehingga pada suatu jarak tertentu dari pasak. Jarak ini disebut daerah tahanan efektif yang juga sangat tergantung pada kedalaman pasak. Dari ketiga macam komponen tahanan tanah merupakan besaran yang paling kritis dan paling sulit dihitung atau pun dibatasi.

2.5 Tahanan Jenis Tanah dan Tipe Tanah

⁶⁾Tanah merupakan campuran dari partikel-partikel cair, padat dan gas. Susunan tanah itu sendiri memberikan suatu petunjuk yang baik pada tingkat mana tahanan jenis tanah itu akan diperkirakan. Tahanan jenis tanah dipengaruhi oleh berbagai macam faktor, oleh karena tahanan jenis tidak dapat diberikan sebagai suatu nilai yang ditetapkan. Sering dicoba untuk mengubah komposisi tanah dengan memberikan garam pada tanah yang dekat pada elektroda pentanahan, dengan maksud mendapat jenis tanah yang rendah. Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah yang konstan. Karena kadangkala dipengaruhi oleh temperatur dan kelembaban secara bervariasi.

⁶⁾Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.



⁷⁾Tabel 2.1 Tahanan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah (Ω -m)
Tanah rawa, sawah	0 – 150
Tanah liat	10 – 200
Tanah garapan	100 - 1000
Pegunungan biasa	200 – 1000
Pegunungan berbatu	2000 - 3000
Pinggir sungai berbatu	1000 - 5000

Dalam penggunaan data-data diatas sering terjadi kesulitan karena komposisi tanah biasanya terdiri dari dua atau lebih kombinasi lapisan dari bermacam-macam tanah. Hal yang penting dalam menyelidiki karakteristik tanah ialah mencari tahanan jenis tanah. Harga tahanan jenis tanah ini selalu bervariasi sesuai dengan keadaan tanah pada saat pengukuran, karena itu sebaiknya dicantumkan keadaan cuaca dan basah keringnya tanah pada waktu pengukuran dilakukan.

⁷⁾ Locit hal 23



Tahanan jenis tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$^8) \quad \rho = 2 \pi a R$$

Dengan rumus sebagai berikut :

ρ = tahanan jenis rata-rata tanah (ohm-meter)

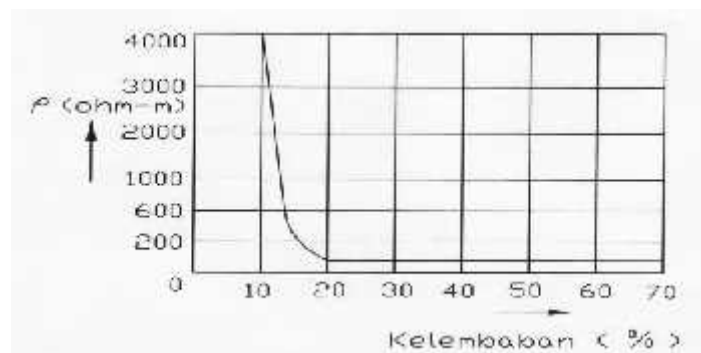
a = jarak antara batang elektroda yang terdekat (meter)

R = besar tahanan yang diukur (ohm)

2.6 Pengaruh Kelembaban

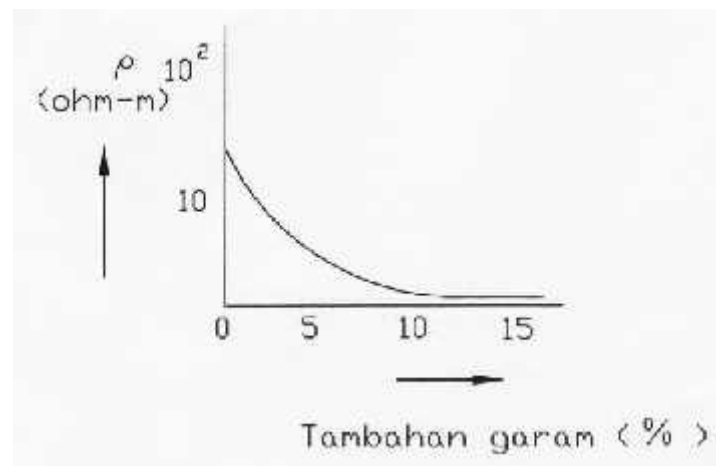
Harga tahanan jenis tanah sangat dipengaruhi oleh konsentrasi air tanah. Pada kelembaban tanah yang rendah tahanan jenis tanah besar, sebaliknya semakin besar konsentrasi air dalam tanah, maka harga tahanan jenis akan semakin kecil. Proses mengalirnya arus listrik didalam tanah sebagai besar adalah karena proses elektrolisis, maka dari itu dari dalam air tanah akan mempengaruhi konduktivitas atau daya hantar listrik tanah tersebut. Dengan demikian tahanan jenis tanah akan dipengaruhi pula oleh besaran konsentrasi air tanah. Semakin besar tanah sebagai besar adalah karena proses elektrolisis, maka dari itu konsentrasi air di dalam tanah maka konduktivitas tanah akan semakin besar, sehingga tahanan jenis tanah akan turun sesuai dengan hubungan pada gambar 2.3 dibawah ini. Tanah yang kering atau tanah dengan konsentrasi air dalam tanahnya rendah sekali dibawah 10, mempunyai tahanan jenis yang besar sekali atau dengan kata lain merupakan isolator yang baik. Tetapi dengan kenaikan konsentrasi air sampai 15 %, tahanan jenis tanah akan menurun dengan cepat sekali.

⁸⁾ AS Pabla dan Abdul Hadi. 1991. Sistem Distribusi Daya Listrik



Gambar 2.3 Perubahan Tahanan Jenis Tanah Terhadap Kelembaban

Satu hal yang menarik dari gambar 2.3 adalah bahwa harga tahanan jenis tanah menunjukkan adanya kejenuhan untuk kelembaban harga tahanan diatas 15 %, Oleh karena itu, penting bagi kita untuk menambakan elektroda pentanahan pada tempat yang berhubungan langsung dengan air tanah. Untuk melakukan hal ini elektroda-elektroda pentanahan ditanam di tempat-tempat yang cukup dalam di bawah permukaan air. Dengan jalan demikian pula, maka pengaruh perubahan musim terhadap tahanan jenis tanah atau terhadap tahanan pentanahan elektroda dapat diperkecil. Cara lain untuk memperkecil tahanan jenis tanah serta pengaruh dari musim adalah dengan jalan memberikan semacam zat kimia disekitar elektroda secara periodik yang terlihat pada gambar 2.4 dibawah ini.

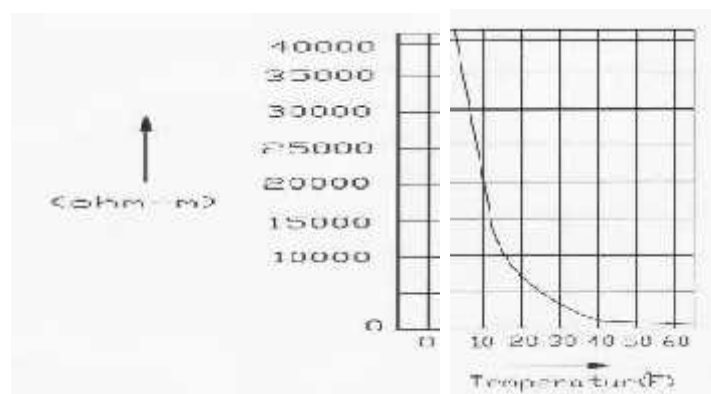


Gambar 2.4 Penggaramaan Tanah

Zat kimia tersebut akan memperkecil tahanan jenis tanah disekitar elektroda pentanahan, sehingga tahanan pentanahan serta perubahannya karena musim akan menjadi kecil.

2.7 Pengaruh Suhu atau Temperatur

Temperatur tanah disekitar elektroda pentanahan juga berpengaruh terhadap besaran tahanan jenis tanah terutama bila temperatur dibawah titik beku.



Gambar 2.5 Pengaruh temperatur terhadap tahanan jenis tanah



Dibawah harga titik beku, perubahan temperatur yang sedikit saja akan menyebabkan harga tahanan jenis tanah tersebut dengan cepat mengalami kenaikan. Pada temperatur dibawah titik beku, air didalam tanah akan membeku, molekul-melekul air dalam tanah akan sulit untuk bergerak sehingga daya hantar listrik tanah menjadi rendah sekali.

2.8 Pentanahan Peralatan

Pentanahan peralatan adalah penghubung bagian-bagian peralatan listrik yang 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 atau tidak normal (ada gangguan). Sistem pentanahan ini berguna untuk memperoleh potensial yang merata dalam suatu bagian struktur dan peralatan serta untuk memperoleh impedensi yang rendah sebagai jalan balik arus hubungan singkat ke tanah dialiri arus dan antara bagian - bagian ini dengan tanah sampai pada yang aman untuk semua kondisi operasi baik kondisi normal maupun saat gangguan. Sistem pentanahan ini berguna untuk memperoleh potensial yang merata dalam suatu bagian struktur dan peralatan serta untuk memperoleh impedensi yang rendah sebagai jalan balik arus hubungan singkat ke tanah. Pentanahan peralatan pada umumnya menggunakan dua macam sistem pentanahan yaitu sistem grid (horizontal) dan sistem rod (vertikal). Sistem pentanahan grid adalah menanamkan batang-batang elektroda sejajar dengan permukaan tanah, hal ini merupakan usaha untuk meratakan tegangan yang timbul.

Sedangkan sistem pembumian rod ialah menanamkan batang - batang elektroda tegak lurus kedalam tanah, hal ini fungsinya hanya mengurangi (memperkecil) tahanan pembumian. Adapun penjelasan



dari kedua sistem pentanahan peralatan diatas adalah sebagai berikut :

2.8.1 Pentanahan Grid

Bentuk fisiknya seperti bujur sangkar, empat persegi panjang tergantung pada daerahnya. Pada sistem ini batang-batang elektroda ditanam sejajar dibawah permukaan tanah, batang-batang ini terhubung satu sama lain. ⁹⁾Keuntungan dengan pentanahan ini adalah pemasangannya lebih mudah terutama pada daerah berbatu, serta gradient tegangan pada sistem pentanahan grid akan lebih rata. Sedangkan kekurangannya dengan cara ini jumlah konduktor yang ditanam banyak sekali, maka bentuknya mendekati bentuk plat dan ini merupakan bentuk maksimum atau yang mempunyai harga tahanan paling kecil luas daerah tertentu, tetapi bentuk ini tidak efisien / mahal. Pada sistem ini banyaknya konduktor akan tak terbanding dengan tahanannya oleh karena fungsi dari konduktor sebenarnya adalah menyalurkan arus kedalam tanah. Bila elektroda saling berdekatan maka volume tanah tidak bisa menerima arus dari elektroda-elektroda tersebut, dengan kata lain volume tanah tidak terbatas kemampuannya untuk menerima arus. Pada pentanahan grid umumnya elektroda-elektrodanya ditanam sejajar satu dengan yang lainnya pada kedalaman beberapa puluh senti meter didalam tanah. Untuk lebih memperkecil harga tahanan pentanahannya harus diperluas daerah pentanahannya karena cara ini lebih mudah bila dibandingkan dengan cara memperdalam konduktor.

2.8.2 Pentanahan Rod

Pentanahan rod yaitu sistem pentanahan yang menanamkan elektroda pentanahan tegak lurus di permukaan tanah, kelebihanannya

⁹⁾ Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.



hanya untuk mengurangi atau memperkecil tahanan pentanahan, maka jumlah penanaman batang elektroda pentanahan dapat diperbanyak. Kekurangannya bila terjadi arus gangguan ke tanah, maka arus gangguan ini akan mengakibatkan naiknya gradien di permukaan tanah. Besarnya tegangan maksimum yang timbul sebanding dengan tahanan pentanahan.

Bila dilakukan penanaman paralel elektroda yang lebih banyak, maka tahanan pentanahan akan lebih kecil dan distribusi tegangan akan rata. Penanaman batang elektroda tegak lurus dipermukaan tanah dapat berbentuk bujur sangkar atau empat persegi panjang, dengan jarak antara elektroda pentanahan sama. Sedangkan konduktor penghubung antara batang-batang elektroda pentanahan terletak diatas permukaan tanah sehingga tidak di perhitungkan tahananannya. Bila jarak antara konduktor makin pendek dan jumlah konduktor yang ditanam makin banyak, maka akan semakin kecil konduktivitas dari masing-- masing konduktor.

¹⁰⁾ Tujuan pentanahan peralatan ini dapat diformulasikan sebagai berikut:

1. Untuk mencegah terjadinya tegangan kejut listrik yang berbahaya bagi manusia 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.

¹⁰⁾ TS Hutauhuruk. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan



2.9 Pengaruh Tahanan Tanah Terhadap Tahanan Elektroda

Tahanan elektroda pentanahan ke tanah tidak hanya tergantung pada kedalaman dan luas permukaan elektroda, tetapi juga pada tahanan tanah. Tahanan tanah merupakan factor kunci yang menentukan tahanan elektroda dan pada kedalaman berapa elektroda atau pasak harus ditanam agar diperoleh tahanan yang rendah. Tahanan tanah sangat bervariasi di berbagai tempat, dan berubah tahanannya menurut iklim. Tahanan tanah ini ditentukan oleh kandungan elektrolit didalamnya, kandungan air, mineral-mineral, dan garam-garam. Tanah yang kering mempunyai tahanan yang tinggi, tetapi tanah yang basah dapat juga mempunyai tahanan yang tinggi apabila tidak mengandung garam-garam yang dapat larut.

Karena tahanan tanah berkaitan langsung dengan air dan suhu, maka dapat saja diasumsikan bahwa tahanan pentanahan suatu sistem akan berubah sesuai perubahan iklim setiap tahunnya. Variasi-variasi tersebut dapat dilihat karena kandungan air dan suhu lebih stabil pada kedalaman yang lebih besar, maka agar dapat bekerja efektif sepanjang waktu, sistem pentanahan dapat dikonstruksikan dengan elektroda atau pasak tanah yang ditancapkan cukup dalam dibawah permukaan tanah. Hasil terbaik akan diperoleh apabila kedalaman elektroda atau pasak mencapai tingkat kandungan air yang tetap.

2.10 Ukuran-ukuran Penghantar Tanah ¹¹⁾

Penghantar-penghantar dan elektroda-elektroda baja digunakan untuk saluran distribusi dan pentanahan gardu induk. Luas minimum penghantar yang diperlukan dapat dicari dari rumus berikut :

¹¹⁾ AS Pabla dan Abdul Hadi. 1991. Sistem Distribusi Daya Listrik.



Luas (mm^2) = $12,15 \times 10^{-3} I\sqrt{t}$ untuk sambungan-sambungan yang dilas
 Luas (mm^2) = $15,7 \times 10^{-3} I\sqrt{t}$ untuk sambungan-sambungan dengan sekrup.

Dimana :

I = Arus gangguan dalam Ampere

t = Lamanya terjadi gangguan, biasanya diambil dari 5

Dalam memilih penghantar, selain stabilitas termal sesuai dengan penggunaan rumus diatas, kekuatan terhadap gerak mekanis dan terhadap korosi pemilihan penghantar dapat dipertimbangkan. Terhadap gerak mekanis ukuran minimum penghantar baja plat strip tidak boleh kurang dari $10 \times 6 \text{ mm}^2$ dan untuk ketahanan terhadap korosi pemilihan penghantar dapat mempertimbangkan hal berikut :

1. Untuk tanah yang bersifat korosif sangat lambat, dengan tahanan diatas $100\Omega\text{-m}$, tidak ada batas perkenan korosi (*corrosion allowance*)
2. Untuk tanah yang bersifat korosif lambat, dengan tahanan 25-100 $\Omega\text{-m}$, batas perkenan korosi adalah 15 % dengan pemilihan penghantar sudah mempertimbangkan faktor stabilitas termal.
3. Untuk tanah yang bersifat korosif cepat, dengan tahanan kurang dari $25\Omega\text{-m}$, batas perkenan korosi adalah 30 % dengan pemilihan penghantar sudah mempertimbangkan faktor stabilitas termal

Dibandingkan dengan sambungan sekrup pada sambungan las dapat timbul sedikit korosi pada sambungan oleh bahan las atau teknik pengelasannya sendiri. Hindarkan cara las titik dan gunakan las kontinyu. Penghantar dapat dipilih dari ukuran-ukuran standar seperti $10 \times 6 \text{ mm}^2$, $20 \times 6 \text{ mm}^2$, $30 \times 6 \text{ mm}^2$, $40 \times 5 \text{ mm}^2$, $50 \times 6 \text{ mm}^2$, $60 \times 6 \text{ mm}^2$, $50 \times 8 \text{ mm}^2$, $65 \times 8 \text{ mm}^2$.



2.11 Penghantar Tanah

Fungsi penghantar untuk menyalurkan energi dari satu titik ke titik yang lain. Penghantar yang digunakan dalam kelistrikan adalah berisolasi dapat berupa kawat berisolasi atau kabel. Ada juga penghantar tanpa isolasi atau BC. Bahan BC (Bare Conductor), penghantar berlubang (Hollow Conductor), ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), dan ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced) bahan penghantar yang kebanyakan digunakan adalah aluminium dan tembaga. Dalam hal ini bahan penghantar yang digunakan untuk pentanahan sering menggunakan penghantar dari bahan tembaga atau BC.

2.12 Arus yang Diizinkan Lewat Tubuh ¹²⁾

Manusia mempunyai ketahanan tertentu terhadap arus listrik. Ini juga bervariasi dari satu orang dengan yang lainnya. Penyelidikan terhadap pengaruh besarnya arus listrik yang melewati tubuh manusia telah banyak dilakukan, tetapi tidak mendapatkan hasil yang pasti. Percobaan dilakukan dengan mengalirkan arus listrik ke dalam tubuh selama beberapa detik. Umumnya arus mulai terasa pada harga 1 mA. Pada harga 9 mA sampai dengan 25mA dapat menyebabkan rasa sakit dan otot kehilangan control, sehingga diperlukan energi cukup besar untuk melepaskan diri dari konduktor bertegangan tersebut. Arus yang lebih besar dapat menimbulkan kontraksi otot sehingga mengakibatkan kesulitan bernafas. Disamping itu ketahanan manusia terhadap listrik juga berpengaruh oleh besar dan lamanya arus mengalir serta tingkatan arus listrik dalam tubuh manusia. Ada beberapa tingkatan arus listrik yang mengalir di dalam tubuh manusia bila ditinjau dari akibatnya sebagai berikut :

¹²⁾ Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.



2.12.1 Arus Persepsi (Perseption Current)¹³⁾

Bila orang memegang penghantar yang diberi tegangan mulai dari harga nol dan dinaikkan sedikit demi sedikit, arus listrik yang melalui tubuh orang tersebut akan member pengaruh. Mula-mula akan merangsang saraf 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 40 orang laki-laki dan perempuan, dan didapat arus rata-rata yang telah disebut threshold of perception current sebagai berikut :

- a. Untuk laki-laki : 1,1 mA
- b. Untuk perempuan : 0,7 mA

2.12.2 Arus Mempengaruhi Otot (Let-go Current)

Bila tegangan yang menyebabkan terjadinya tingkat arus persepsi dinaikkan lagi maka 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 perempuan dan diperoleh angka rata-rata dari arus yang memperoleh otot sebagai berikut :

- a. Untuk laki-laki : 16 mA
- b. Untuk perempuan : 10,5 mA

¹³⁾ TS Hutauhuruk. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan. Penerbit Erlangga. Hal : 134



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

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

2.12.3 Arus Fibrilasi (Fibrillating Current)¹⁴⁾

Apabila arus yang melewati tubuh manusia lebih besar dari arus yang mempengaruhi otot dapat mengakibatkan orang menjadi pingsan bahkan 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 dan 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 orang yang beratnya 50 kg masih dapat bertahan terhadap besar arus dan waktu yang ditentukan oleh persamaan sebagai berikut :

$$I_k^2 t = K \text{ atau } I_k = k / \sqrt{t}$$

¹⁴⁾ Ibid Hal : 135



Di mana : $k = \sqrt{K}$

$K = 0,0135$ untuk manusia dengan berat 50 kg

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

Maka

$K_{50} = 0,116$ Ampere

$K_{70} = 0,157$ Ampere

Jadi : $I_k^2 \cdot t = 0,0135$ untuk berat badan 50 kg.

Dan

$$I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

Dimana :

I_k = besarnya arus lewat tubuh manusia (dalam ampere)

t = waktu arus lewat tubuh manusia atau lama gangguan tanah

(dalam detik)

2.12.4 Arus Reaksi (reaction current) ¹⁵⁾

Arus reaksi adalah arus yang terkecil yang dapat mengakibatkan orang menjadi terkejut, hal ini cukup berbahaya karena dapat mengakibatkan kecelakaan sampingan. Penyelidikan oleh Dr. Hans Prinz menurut tabel sebagai berikut :

¹⁵⁾ TS Hutauhuruk. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan

Pengetanahan Peralatan. Penerbit Erlangga. Hal : 136



Tabel 2.2 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 control.
1,2 – 1,6 mA	Mulai terasa seakan-akan ada yang merayap di dalam tangan.
1,6 – 6,0 mA	Tangan sampai ke siku merasa kesemutan.
6,0 – 8,0 mA	Tangan mulai kaku, rasa kesemutan makin bertambah.
13 – 15,0 mA	Rasa sakit tidak tertahankan, penghantar masih dapat melepaskan dengan gaya yang besar sekali.
15 – 20,0 mA	Otot tidak sanggup lagi melepaskan penghantar.
20 – 50,0 mA	Dapat mengakibatkan kerusakan pada tubuh manusia.
50 – 100,0 mA	Batas arus yang dapat menyebabkan kematian.



2.13 Tahanan Tubuh Manusia ¹⁶⁾

Arus yang mengalir melewati tubuh manusia dibatasi oleh tahanan kontak antara tangan dengan konduktor yang disentuh, tahanan tubuh dan tahanan kontak antara kaki dengan tanah. Untuk menghitung tahanan kontak antara kaki dengan tanah, telapak kaki dapat dianggap sebagai elektroda pelat dengan radius 8 cm. Dengan demikian tahanan kontak ketanah dapat dihitung.

Oleh para ahli telah ditentukan bahwa besarnya tahanan ini adalah $6 \rho_s$ untuk setiap kaki. Dalam prakteknya tahanan tersebut tiap kaki dianggap $3 \rho_s$ karena mengingat adanya factor keamanan sehingga untuk dua kaki besarnya tahanan kontak ini adalah sebesar $1,5 \rho_s$.

Tahanan tubuh manusia berkisar antara 500 ohm sampai beberapa ribu ohm. Percobaan yang dilakukan Dalziel terhadap beberapa orang menghasilkan data-data sebagai berikut :

- a. Arus yang mengalir lewat tubuh 9 mA.
- b. Tegangan antara tangan dengan tangan 21V.
- c. Tegangan antara tangan dengan kaki 10,2V.

Dari data-data tersebut dapat dihitung tahanan dari tangan ke tangan yaitu $\frac{21}{0,009}$ atau 2333 dan tahanan dari tangan ke kaki yaitu $\frac{10,2}{0,009}$ atau 1133 Ω . Laurent menyarankan tahanan tubuh manusia adalah 3000 ohm. Dalam buku standar IEEE 80 tahun 1976 disarankan 1000 Ω dan harga ini dapat dipakai pegangan untuk perhitungan selanjutnya. Tahanan 1000 Ω menyatakan tahanan tubuh dari tangan ke kaki dan dari kaki ke kaki.

¹⁶⁾ Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.

Tabel 2.3 berbagai harga tahanan tubuh manusia ¹⁷⁾

PENELITI	TAHANAN Ω	KETERANGAN
Dalziel	500	Dengan tegangan 60 cps
AIEE Committee Report 1958	2300	Dengan tegangan 21 Volt Tangan ke tangan $I_k = 9$ mA
	1130	Tangan ke kaki
	1680	Tangan ke tangan dengan arus searah
	800	Tangan ke kaki dengan 50 cps
Laurent	3000	

2.14 Tegangan

Pada sistem tegangan tinggi sering terjadi kecelakaan terhadap manusia, dalam hal terjadi kontak langsung atau hal dalam manusia berada di dalam suatu daerah yang mempunyai gradien tegangan tinggi. Tetapi sebenarnya yang menyebabkan bahaya itu adalah besarnya arus yang mengalir pada tubuh manusia.

2.15 Jenis-jenis tegangan

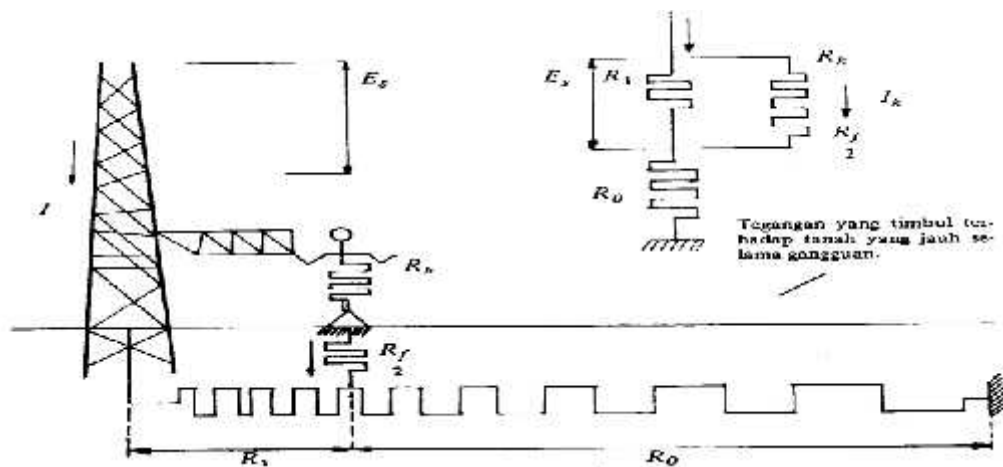
Sulit untuk membedakan secara tepat mengenai perhitungan tegangan yang mungkin timbul akibat kesalahan ke tanah terhadap orang yang berada di dalam atau di sekitar GI, karena banyaknya factor yang mempengaruhi dan tidak diketahui. Pada hakekatnya perbedaan tegangan selama mengalir arus gangguan tanah dapat digambarkan sebagai berikut :

¹⁷⁾ TS Hutauhুরু. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan. Penerbit Erlangga. Hal : 137



2.15.1 Tegangan sentuh ¹⁸⁾

Tegangan sentuh adalah tegangan antara bagian logam yang dihubungkan dengan sistem pentanahan dengan suatu titik dipermukaan tanah sejauh jangkauan orang normal yang berdiri dari logam tersebut. Perbedaan tegangan ini disebabkan oleh adanya arus kesalahan. Gambar 2.6 menunjukkan proses terjadinya besar arus gangguan oleh tahanan orang dan tahanan kontak ke tanah dari kaki orang tersebut.



Gambar 2.6 Proses terjadinya tegangan sentuh. ¹⁹⁾

Keterangan gambar :

- R_o = Tahanan antara tempat kita berdiri dengan tempat yang jauh (tanah referensi).
- R_i = Tahanan antara tempat kita berdiri dengan peralatan.
- $R_o + R_i$ = Besar tahanan pentanahan total.
- R_f = Tahanan tubuh yang ada di bawah tiap kaki.
- R_k = Tahanan tubuh manusia.

¹⁸⁾ Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.

Laporan skripsi. Hal : 17

¹⁹⁾ TS Hutauhuruk. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan

Pengetanahan Peralatan. Penerbit Erlangga. Hal : 130



Dari rangkaian pengganti dapat dilihat hubungannya sebagai berikut :

$$E_s = \left(R_k + \frac{R_f}{2} \right) \times I_k \quad 20)$$

Dimana :

E_s = tegangan sentuh (volt)

R_k = tahanan badan orang (= 1000 Ohm)

R_f = tahanan kontak ke tanah dari satu kaki pada tanah yang diberi lapisan koral 10 cm (= 3000 Ohm)

I_k = besarnya arus yang melalui badan (Ampere)

Tahanan badan orang telah diselidiki oleh beberapa ahli sebagaimana terdapat dalam tabel dan sebagai harga pendekatan diambil $R_k = 1000$ Ohm. Tahanan R_f mendekati harga $3 \rho_s$ dimana ρ_s adalah tahanan jenis tanah disekitar permukaan. Arus I_k diambil dari harga dalam persamaan, dimana $I_k = 0,116/\sqrt{t}$.

$$E_s = \left(1000 + \frac{3\rho_s}{2} \right) \times \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

Dimana :

ρ_s = tahanan jenis tanah disekitar permukaan tanah (Ohm-meter) = 3000 Ohm-meter untuk permukaan tanah yang dilapisi koral 10 cm.

T = waktu kejut (detik) atau lama gangguan tanah.

Dengan jalan yang dilakukan dengan menggunakan sistem pentanahan, maka tegangan sentuh ditekan pada harga yang tidak lagi membahayakan. Harga yang dihitung diatas merupakan harga tegangan maksimum dimana ventricular fibrillation current belum terjadi.

²⁰⁾ Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.



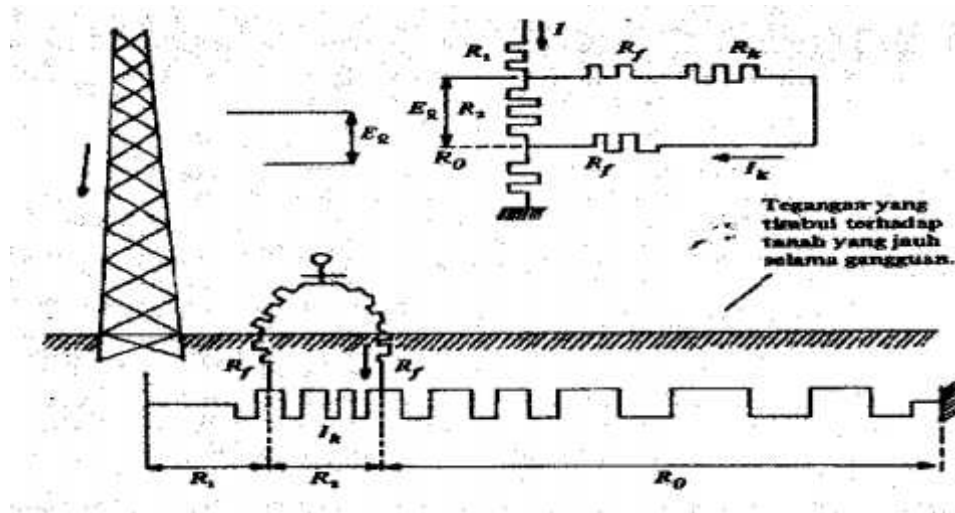
Tabel 2.4. Tegangan sentuh yang diijinkan dan lama gangguan ²¹⁾

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

2.15.2 Tegangan Langkah

Tegangan langkah adalah tegangan yang timbul diantara dua kaki orang sedang berdiri di atas tanah yang sedang dialiri oleh arus kesalahan ke tanah (lihat gambar 2.7). Dalam hal ini dimisalkan jarak antara kedua kaki orang adalah 1 meter dan diameter kaki dimisalkan 8 cm dalam keadaan tidak memakai sepatu.

²¹⁾ TS Hutauhuruk. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan. Penerbit Erlangga. Hal : 131



Gambar 2.7 Proses terjadinya tegangan langkah.²²⁾

Besarnya tahanan pentanahan total adalah :

$R_1 + R_2 + R_3$, dimana :

R_1 = Tahanan pentanahan antara peralatan dan kaki pertama

R_2 = Tahanan antara dua kaki.

R_0 = Tahanan antara kaki ke dua dengan tempat yang jauh.

R_k = Tahanan badan ke dua kaki.

R_f = Tahanan tanah yang ada di bawah tiap kaki.

Dari Gambar 2 .7, didapatkan

$$E_{\text{langkah}} = (R_k + 2 R_f) I_k \quad ^{23)}$$

Dengan menggunakan rangkaian pengganti dapat ditentukan tegangan langkah sebagai berikut :

²²⁾ Ibid Hal : 132

²³⁾ Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.



$$\begin{aligned}
 E_l &= (R_k + 2R_f) \times I_k \text{ 24)} \\
 &= (1000 + 6 \rho_s) \times \frac{0,116}{\sqrt{t}} \\
 E_l &= \frac{116 + 0,696 \times \rho_s}{\sqrt{t}}
 \end{aligned}$$

Dimana :

- l = tegangan langkah (volt)
- R_k = tahanan badan orang (ohm) = 1000 Ohm
- R_f = tahanan kontak ke tanah dari satu kaki (ohm) = $3 \rho_s$
- t = waktu kejut (detik)
- ρ_s = tahanan jenis tanah disekitar permukaan tanah (ohm-meter)
= 3000 ohm-meter untuk permukaan tanah yang dilapisi koral
10 cm

²⁴⁾ Locit Hal : 132



Tabel 2.5. Tegangan langkah yang diijinkan dan lama gangguan ²⁵⁾

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

Ada dua hal yang perlu diperhatikan disini bahwa, hukum R_k sebenarnya berbeda dengan harga R_k pada tegangan sentuh, tetapi perbedaan tersebut kecil sehingga dapat dianggap sama. Demikian juga harga I_k diatas sebenarnya juga kurang tepat karena arus antara kaki-kaki yang mulai timbul ventricular fibrillation current adalah 25 Kali arus kaki-tangan yang dapat menimbulkan hal yang sama.

Tetapi IEEE mengajurkan harga I_k yang sama karena alasan keamanan. Sebab walaupun arus kaki kurang berbahaya, tetapi kejutan yang ditimbulkan dapat membuat orang jatuh dan arus yang melewati tubuh.

²⁵⁾ TS Hutauhuruk. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan

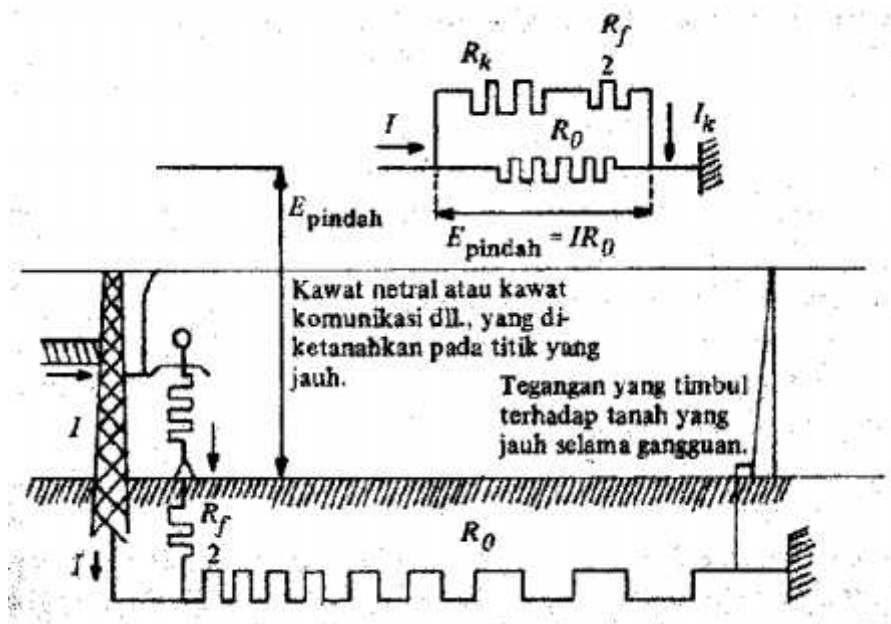


2.15.3 Tegangan Pindah ²⁶⁾

Tegangan pindah terjadinya sama dengan proses terjadinya tegangan sentuh, hanya saja disini benda yang disentuh yang ditanahkan ditempat jauh atau orang yang menyentuh benda yang ditempat yang jauh ditanahkan dengan gardu. Sebagai contoh tentang terjadinya tegangan ini, bila kita mempunyai transformator pengubah tegangan tinggi ke tegangan yang rendah, gardu yang dipakai untuk mensuplai rumah-rumah disekitarnya dimana netral transformator dan rumah mendapat suplai dari kawat fasal dan netral. Bila terjadi hubungan tanah di gardu, maka titik netral tersebut akan mempunyai beda tegangan yang besar terhadap tanah di rumah yang disuplai tersebut dan akan membahayakan.

Kalau diperhatikan ketiga keadaan diatas, maka terlihat bahwa arus kesalahan total I akan terbagi dua, dimana arus sebesar I_k akan melewati badan, sedangkan sisanya sebesar $I - I_k$ akan langsung menuju ke tanah. Tetapi arus I , besarnya dalam orde ratusan ampere hingga I_k dapat diabaikan terhadap arus kesalahan I . Dengan demikian, dapat dianggap bahwa tegangan antara peralatan dengan tanah sebelum dan sesudah dipegang adalah sama. Sebagai tambahan perlu kiranya diterangkan bahwa telah dibuat standar untuk menentukan besar tegangan sentuh maksimum yang diperbolehkan. Tentu saja standar-standar tersebut agak berbeda antara satu dengan yang lainnya berikut penjelasannya dan beserta gambar tegangan pindah dibawah ini :

²⁶⁾ Hasan Basri. 1986. Pengukuran Tahanan Pentanahan Gardu Induk.



Gambar 2.8 Proses terjadinya tegangan pindah.

RUMUS :

²⁷⁾ $E_{\text{pindah}} = I R_0$, dengan anggapan $I_k \ll I$ sebab

$$\frac{R_f}{2} + R_k \gg R_0$$

Dimana :

$$R_0 = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

Dan :

r = Jari-jari ekuivalen dari luas gardu induk

L = Panjang total dari konduktor kisi-kisi dan batang

Untuk waktu tertentu dari arus gangguan dalam detik, tegangan pindah yang diijinkan adalah sama dengan tegangan sentuh.

²⁷⁾ TS Hutauhuruk. 1991. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan

Pengetanahan Peralatan. Penerbit Erlangga. Hal : 134