

BAB II

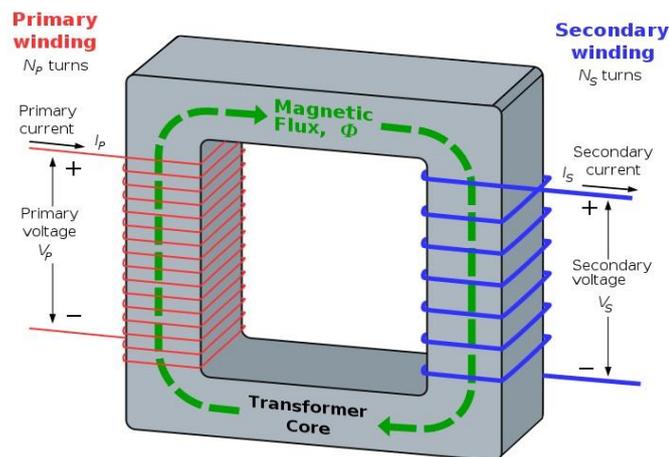
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator ^[1]

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet.

Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnetik, menghendaki adanya gandingan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandingan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama.



Gambar 2.1 Transformator ^[2]

^[1] Zuhail. 2000. *Dasar Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya*. Jakarta. PT. Gramedia Pustaka Utama.

² <https://lumbanrajateddy.wordpress.com/2012/03/07/transformator/> (28 juni 2022)

2.1.1 Bagian-bagian transformator tenaga ^[3]

Komponen transformator terdiri dari dua bagian, yaitu peralatan utama dan peralatan bantu, Peralatan utama transformator terdiri dari:

1. Kumparan transformator

Kumparan trafo terdiri dari beberapa lilitan kawat tembaga yang dilapisi dengan bahan isolasi (karton, partiax, dll) untuk mengisolasi baik terhadap inti besi maupun kumparan lain. Untuk trafo dengan daya besar lilitan dimasukkan dalam minyak trafo sebagai media pendingin. Banyaknya lilitan akan menentukan besar tegangan dan arus yang ada pada sisi sekunder. Kadang kala transformator memiliki kumparan tertier. Kumparan tertier diperlukan untuk memperoleh tegangan tertier atau untuk kebutuhan lain. Untuk kedua keperluan tersebut, kumparan tertier selalu dihubungkan delta. Kumparan tertier sering juga untuk dipergunakan penyambungan peralatan bantu seperti kondensator synchrone, kapasitor shunt, dan reactor shunt.

2. Inti besi

Dibuat dari lempengan-lempengan feromagnetik tipis yang berguna untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi ini juga diberi isolasi untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy "*Eddy Current*".

3. Minyak trafo

Berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak trafo mempunyai sifat media pemindah panas (disirkulasi) dan mempunyai daya tegangan tembus tinggi. Pada power transformator, terutama yang berkapasitas besar, kumparan-kumparan dan inti besi transformator direndam dalam minyak-trafo.

4. Bushing

Sebuah konduktor (porselin) yang menghubungkan kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing diselubungi dengan suatu isolator

^[3] PT PLN (Persero). 2014. *Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*. Jakarta.

dan berfungsi sebagai konduktor tersebut dengan tangki transformator. Selain itu juga bushing juga berfungsi sebagai pengaman hubung singkat antara kawat yang bertegangan dengan tangki trafo

5. Tangki Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo ditempatkan di dalam tangki baja. Tangki trafo-trafo distribusi umumnya dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin (*cooling fan*) yang berfungsi memperluas permukaan dinding tangki, sehingga penyaluran panas minyak pada saat konveksi menjadi semakin baik dan efektif untuk menampung pemuaian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.

6. Pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi di dalam trafo, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut trafo perlu dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar trafo. Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa: udara, gas, minyak dan air. Pada transformator tenaga di PLTU Bukit Asam sistem pendingin yang digunakan adalah jenis OFAF, yaitu pada tipe ini oil akan didinginkan dengan bantuan pompa agar sirkulasi semakin cepat dan juga dibantu kipas/fan pada radiatornya. Khusus jenis trafo tenaga tipe basah, kumparan-kumparan dan intinya direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai media pemindah panas dan bersifat pula sebagai isolasi (tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Untuk itu minyak trafo harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- Ketahanan isolasi harus tinggi (>10 kV/mm)
- Berat jenis harus kecil, sehingga partikel-partikel inert di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan

pendinginan menjadi lebih baik.

- Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan. Tidak merusak bahan isolasi padat (sifat kimia).

Tabel 2.1 Sistem Pendingin Trafo

NO	Jenis Sistem Pendingin	Media			
		Di Dalam Trafo		Di luar Trafo	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7	OFWF	-	Minyak	-	Air
8	ONAN / ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN / OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN / OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN / OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

7. Tap Changer (Perubahan tab)

Yaitu suatu alat yang berfungsi untuk merubah kedudukan tap (sadapan) dengan maksud mendapatkan tegangan keluaran yang stabil walaupun beban berubah-ubah. Tap changer selalu diletakkan pada posisi tegangan tinggi dari trafo pada posisi tegangan tinggi. Tap changer dapat dilakukan baik dalam keadaan berbeban (on-load) atau dalam keadaan tidak berbeban (off load), tergantung jenisnya.

8. Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator yang antara lain sebagai berikut:

- Indikator suhu minyak
- Indikator permukaan minyak
- Indikator sinema pendingin
- Indikator kedudukan tap

2.2 Sistem Pentanahan ^[4]

Salah satu pengaman yang paling baik terhadap peralatan listrik dari gangguan arus lebih ataupun hubungan singkat adalah, dengan cara pembumian. Cara ini juga dapat melindungi manusia dari adanya bahaya-bahaya yang timbul dan dapat memakan korban. Cara memasang pentanahan adalah 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 akan dilaksanakan. Maka harus ada system pentanahan yang dirancang dengan benar. Agar system pentanahan dapat bekerja efektif. Adapun persyaratan pentanahan sebagai berikut:

- a. Membuat jalur impedansi rendah ketanah untuk pengamanan personil dan peralatan menggunakan rangkaian efektif.
- b. Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat surya hubungan (*surge currents*).
- c. Menggunakan bahan tahan korosi terhadap bagian kondisi kimiawi tanah, untuk meyakinkan kontinuitas sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
- d. Menggunakan system mekanik yang kuat namun mudah dalam pemeliharaan.

2.3 Fungsi dan Tujuan Pentanahan

- a. Fungsi pengetanahan

Pada dasarnya semua konstruksi jaringan distribusi tidak ada yang benar-

^[4] As Pabla, dan Abdul Hadi. 1991. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta : Erlangga.

benar aman dari gangguan yang datangnya dari dalam sistem itu sendiri maupun dari dari luar sistem. Gangguan tersebut merupakan potensi yang merugikan.

Grounding memiliki 3 fungsi utama :

1. Perlindungan dari tegangan tinggi

Kilat atau petir dengan tegangan yang tinggi dapat berbahaya pada distribusi listrik sistem kawat. Grounding dipasang pada sistem instalasi listrik di rumah atau tempat kerja yang mengurangi atau menghindari kerusakan atau bahaya yang disebabkan oleh tegangan tinggi tersebut.

2. Penstabil tegangan

Banyak terdapat sumber tegangan. Tiap transformator dapat dimasukkan dalam sumber khusus. Jika tidak terdapat titik referensi umum untuk semua sumber tegangan ini, akan terjadi kesulitan yang sangat sulit untuk dihitung hubungannya masing-masing.

3. Mengatasi arus yang berlebih

Fungsi ini merupakan fungsi paling penting untuk dimengerti. Sistem grounding menyediakan level keselamatan tertentu untuk manusia dan peralatan dari bahaya/ kerusakan. Alasan utama mengapa grounding digunakan dalam penyaluran listrik adalah karena faktor keamanan. Ketika semua bagian logam dalam peralatan listrik di grounding lalu jika isolasi di dalam peralatan gagal, maka tidak ada tegangan berbahaya yang terjadi. Lalu ketika kabel bertegangan bersentuhan dengan bagian yang dibumikan/digroundkan lalu rangkaian terhubung singkat atau konsleting maka sekering akan dengan segera putus. Ketika sekering putus maka bahaya akan dapat di cegah. Keamanan merupakan fungsi utama grounding. Sistem grounding dirancang agar mereka benar-benar menyediakan fungsi keamanan yang dibutuhkan. Grounding mempunyai beberapa fungsi lain namun keselamatan merupakan hal yang tidak bisa dikompromikan lagi. Simbol pertama biasa disebut “earth ground” dan biasanya di gunakan pada chasis atau sambungan ground pengaman.

Pada sistem distribusi 20 kV hal yang terpenting pada sistem proteksi selain alat proteksi itu sendiri, sistem pentanahan juga merupakan bagian yang tidak terpisahkan dalam sistem proteksi itu sendiri. Misalnya ada gangguan fasa yang bocor ke tanah, maka bila sistem pentanahan tidak sesuai dengan sistem distribusi yang diproteksi, maka alat proteksi tidak akan bekerja dengan benar, sehingga dapat merusak peralatan jaringan maupun membahayakan keselamatan manusia.

Sistem pentanahan pada kenyataannya di PLN terdapat beberapa pola, sehingga sistem proteksinya juga berbeda-beda. Pada perencanaan konstruksi jaringan distribusi untuk menentukan komponen jaringan, misalnya penghantar, harus dipertimbangkan besarnya arus gangguan hubung singkat ke tanah dan selanjutnya sistem proteksi yang sesuai, sehingga tujuan membangun konstruksi jaringan distribusi yang aman dan menguntungkan dapat tercapai.

b. Tujuan pentanahan

Tujuan dari sebuah pentanahan adalah sebagai berikut:

1. Untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang tidak dilalui arus dan antara bagian-bagian ini dengan tanah sampai pada suatu harga yang aman (tidak membahayakan), untuk semua kondisi operasi normal atau tidak normal. Sistem pembumian ini gunanya ialah untuk memperoleh potensial yang merata (uniform) dalam semua bagian struktur dan peralatan, dan juga untuk menjaga operator atau orang yang berada di daerah instalasi itu berada pada potensial yang sama dan tidak berbahaya pada setiap waktu.
2. Untuk memperoleh impedansi yang kecil/rendah dari jalan balik arus hubung singkat ke tanah. Bila arus hubung singkat ke tanah di paksakan melalui impedansi tanah yang tinggi, hal ini akan menimbulkan busur listrik dan pemanasan yang besarnya cukup untuk menyalakan material yang mudah terbakar.

Secara singkat tujuan pembumian itu dapat diformulasikan sebagai berikut :

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

- b. Untuk memungkinkan timbulnya arus tertentu baik besarnya maupun lamanyadalam keadaan pada bangunan maupun isinya.
- c. Untuk memperbaiki penampilan (performace) dari sistem.

2.3.1 Persyaratan pentanahan

Agar sistem dapat bekerja secara efektif, maka harus memenuhi beberapa persyaratan-persyaratan yaitu sebagai berikut :

- a. Membuat jalur impedansi rendah ke tanah untuk pengaman personil dan peralatan, menggunakan rangkaian yang efektif.
- b. Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat surja hubung.
- c. Menggunakan bahan tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah, untuk meyakinkan kontinuitas penampilannya sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
- d. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam pelayanan.

2.4 Jenis – Jenis Elektroda Pentanahan ^[5]

Dalam PUIL 1977 pasal 330, elektroda – elektroda pentanahan dibagi atas jenis – jenis berikut:

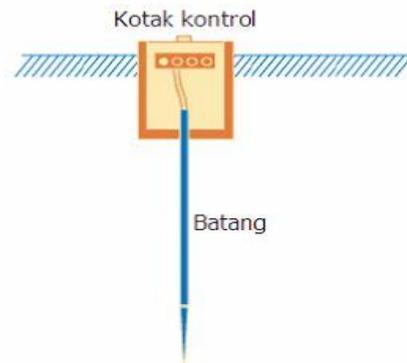
1. Elektroda bentuk batang

Elektroda batang dibuat dari pipa atau besi baja profil yang dipancangkan tegak lurus ke dalam tanah. Panjang elektroda yang harus digunakan disesuaikan dengan tahanan pentanahan yang diperlukan. Untuk memancangkan elektroda-elektroda ini sering digunakan palu lantak. Elektroda-elektroda tersebut dapat juga dimasukkan ke dalam tanah dengan getaran, dengan menggunakan palu kango.

Kalau tanahnya kering, kadang-kadang sangat sulit untuk mencapai tahanan penyebaran yang cukup rendah. Dalam hal ini, ada kalanya sifat- sifat tanah itu dapat diperbaiki dengan mengolahnya dengan bahan-bahan kimia. Kalau digunakan beberapa elektroda batang yang dihubungkan paralel, jarak antara elektroda-elektroda ini harus sekurang-kurangnya sama dengan 2 panjang efektif

^[5] P. Van. Harten & Ir. E. Setiawan. 1992. *Instalasi Listrik Arus Kuat* . Bandung : Binacipta.

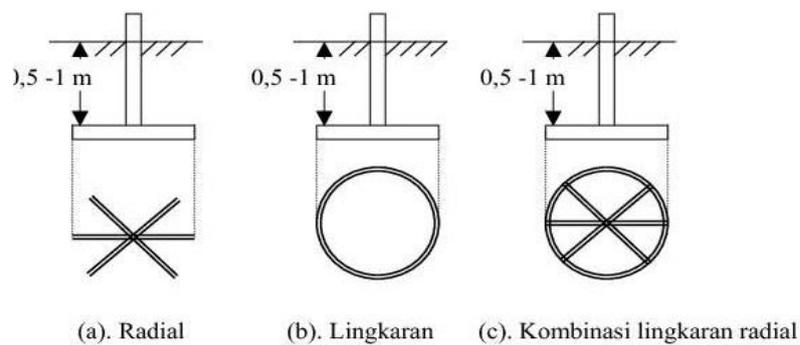
dari satu elektroda, atau sekurang-kurangnya 4 meter. Elektro-elektroda itu tidak boleh berada dalam corong tegangan dari elektroda di sampingnya.



Gambar 2.2 Elektroda bentuk batang

2. Elektroda bentuk pita

Elektroda pita dibuat dari hantaran berbentuk pita atau batang bulat, atau dari hantaran yang dipilin. Elektroda pentanahan ini berbentuk radial, lingkaran atau suatu kombinasi dari bentuk-bentuk tersebut.



Gambar 2.3 Elektroda bentuk pita

Elektroda pita berbentuk radial harus disusun simetris. Jumlah jari-jari yang digunakan tidak perlu lebih dari 6. Penambahan jari-jari melebihi jumlah ini tidak akan mempengaruhi tahanan pentanahannya.

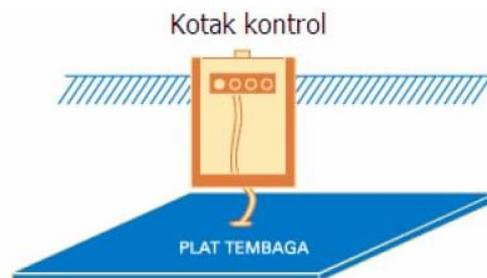
3. Elektroda bentuk plat

Elektroda pelat dibuat dari pelat logam, pelat logam berlubang atau dari kawat kasa. Pelat ini ditanam tegak lurus di dalam tanah, dengan tepi atasnya sekurang-kurangnya satu meter di bawah permukaan tanah.

Luas plat yang harus digunakan tergantung pada tahanan pentanahan yang diperlukan. Pada umumnya selebar plat ukuran 1 m x 0,5 m sudah cukup.

Kalau digunakan beberapa plat yang dihubungkan parallel untuk memperoleh tahanan pentanahan yang lebih rendah, jarak antara plat-plat ini harus sekurang-kurangnya 3 meter.

Untuk mencapai tahanan pentanahan yang sama, elektroda plat memerlukan lebih banyak bahan dibandingkan dengan elektroda pita atau elektroda batang.



Gambar 2.4 Elektroda bentuk plat

4. Elektroda bentuk lain

a. Jaringan Pipa Air

Jaringan pipa air dari logam dapat juga dipakai sebagai elektroda pentanahan. Jika saluran air minum di dalam rumah atau gedung dipakai untuk pentanahan, ujung-ujung pipa di kedua sisi dari meter air harus saling dihubungkan dengan baik. Untuk hubungan ini harus digunakan:

- kawat tembaga berlapis timah putih dengan luas penampang sekurang sekurangnya 16 mm², atau
- kawat baja berlapis seng dengan luas penampang sekurang-sekurangnya 25 mm², atau
- pita baja berlapis seng dengan dengan luas penampang sekurang-kurangnya 25 mm² dan tebal sekurang-kurangnya 3mm.

b. Selubung Logam dari Kabel Tanah

Selubung logam dari kabel tanah yang tidak dibungkus dengan bahan lasi sintetis dan ditanam langsung dalam tanah, dapat dipakai sebagai elektroda pentanahan. Di kedua sisi dari kotak sambung, selubung logam ini harus saling dihubungkan dengan hantaran. Konduktivitas hantaran

penghubung ini harus sekurang-kurangnya sama dengan konduktivitas selubung logam tersebut, luas penampangnya harus sekurang-kurangnya:

- mm^2 Cu untuk kabel tanah dengan luas penampang penghantar sampai dengan 6 mm^2 .
- 10 mm^2 Cu untuk kabel tanah dengan luas penampang penghantar 10 mm^2 atau lebih.

Masing-masing jenis dari elektroda pentanahan di atas memiliki ketentuan ukuran dari berbagai komposisinya. Ukuran minimum elektroda dapat dipilih menurut Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tabel Ukuran Minimum Elektroda Pentanahan

No	Jenis Elektroda	Bahan		
		Baja berlapis seng (Proses panas)	Baja Berlapis Tembaga	Tembaga
1	Elektroda Pita	<p>Pita baja: luas penampang: 100 mm^2 Tebal: 3 mm</p> <p>Hantaran pilin: (<i>Bukan kawat halus</i>) Luas penampang : 95 mm^2</p>	<p>Luas penampang 50 mm^2</p>	<p>Pita tembaga: Luas penampang: 50 mm^2 Tebal: 2 mm</p> <p>Hantaran pilin: (<i>Bukan kawat halus</i>) Luas penampang : 35 mm^2</p>
2	Elektroda Batang	<p>Pipa baja: Diameter: 1''</p> <p>Baja profil: 65x65x7 mm (atau batang profil lain yang setaraf)</p>	<p>Baja bulat: Diameter: 15 mm</p> <p>Tebal lapisan tembaga: 2,5 mm</p>	<p>Pipa tembaga: Luas penampang : 50 mm^2 Tebal : 2 mm</p> <p>Hantaran (<i>hantaran pilin bukan kawat halus</i>)</p>
3	Elektroda Pelat	<p>Pelat baja: Luas : $0,5 - 1 \text{ m}^2$ Tebal : 3 mm</p>	-----	<p>Pelat tembaga: Luas: $0,5 - 1 \text{ m}^2$ Tebal : 2 mm</p>

2.4.1 Sifat-sifat dari sebuah sistem elektroda tanah

Hambatan arus melewati sistem elektroda tanah mempunyai tiga komponen, yaitu:

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

Pasak-pasak tanah, batang-batang logam, struktur dan peralatan lain biasadigunakan 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 ke tanah akan menghantarkan arus ke semua jurusan. Suatu elektroda yang ditanam di tanah yang terdiri atas lapisan-lapisan tanah dengan ketebalan yang sama.

Lapisan tanah terdekat dengan pasak dengan 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, lapisan tanah sudah tidak menambah besarnya tahanan tanah sekeliling pasak.

2.4.2 Ukuran-ukuran penghantar tanah

Penghantar-penghantar dan elektroda-elektroda baja digunakan untuk saluran distribusi dan pentanahn substasion. Dalam memilih penghantar, selain stabilitas termal sesuai penggunaan rumus di atas, kekuatan terhadap gerak mekanis dan terhadap korosi juga perlu dipertimbangkan. Terhadap kekuatan gerak mekanis, ukuran minimum penghantar baja plat strip tidak boleh kurang

dari 10x6 mm² dan untuk ketahanan terhadap korosi, pemilihan penghantar dapat mempertimbangkan hal-hal berikut:

- a. Untuk tanah yang bersifat korosif sangat lambat, dengan tahanan di atas 100 ohm- m, tidak ada batas perkenan korosi
- b. Untuk tanah yang bersifat korosif lambat, dengan tahanan 25-100 ohm-m, batas perkenan korosi adalah 15 % dengan pemilihan penghantar sudah mempertimbangkan factor stabilitas termal.
- c. Untuk tanah yang bersifat korosif cepat, dengan tahanan kurang dari 25 ohm-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 10x6 mm², 20x6 mm², 30x6 mm², 40x6 mm², 50x6 mm², 60x6 mm², 50x8 mm², dan 65x8mm².

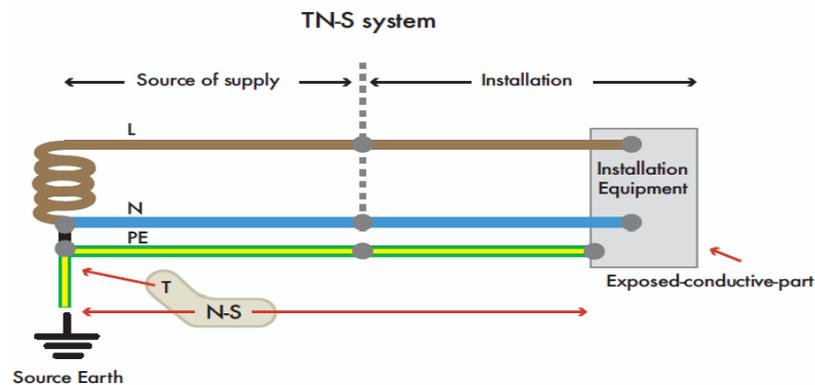
2.5 Macam –Macam Pentanahan

2.5.1 Pentanahan sistem ^[6]

Sistim grounding/pentanahan perlu dimiliki pada suatu instalasi. Dalam pemasangannya, sistim gorunding tersebut terbagi pada beberapa type tergantung dari kebutuhan dan tingkat keamanan yang dibutuhkan serta regulasi yang berlaku pada suatu wilayah yang kadang-kadang menetapkan type jenis pentanahan yang hanya boleh digunakan pada daerah tersebut oleh pejabat berwenang. Ketika akan mendesain suatu sistim instalasi, hal pertama yang perlu dilakukan adalah menentukan type pentanahan apa yang akan digunakan untuk instalasi tersebut. Sistem pentanahan yang digunakan adalah sistem pentanahan dengan titik netral yang ditanahkan, yang dapat dibedakan menjadi 3 yaitu:

^[6] Hari Maghfiroh. 2016. *Macam-Macam Sistem Grounding* di <http://Keretalistrik.com> (diakses 10 juni 2022, jam 20:19)

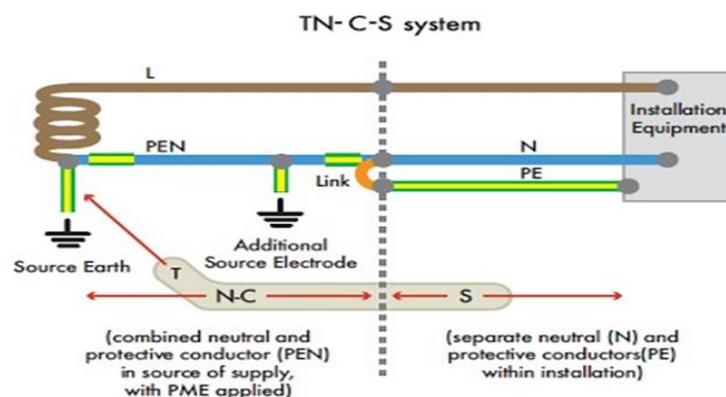
a. TN-S (Terre Neutral – Separate)



Gambar 2.5 TN-S (Terre Neutral – Separate)

Pada sebuah sistem TN-S, bagian netral sumber energi listrik terhubung dengan bumi pada satu titik saja, sehingga bagian netral pada sebuah instalasi konsumen terhubung langsung dengan netral sumber listrik. Type ini cocok pada instalasi yang dekat dengan sumber energi listrik, seperti pada konsumen besar yang memiliki satu atau lebih HV/LV transformer untuk kebutuhan sendiri dan instalasi/peralatan nya berdekatan dengan sumber energi tersebut (transformer).

b. TNC-S (Terre Neutral – Combined – Separate)



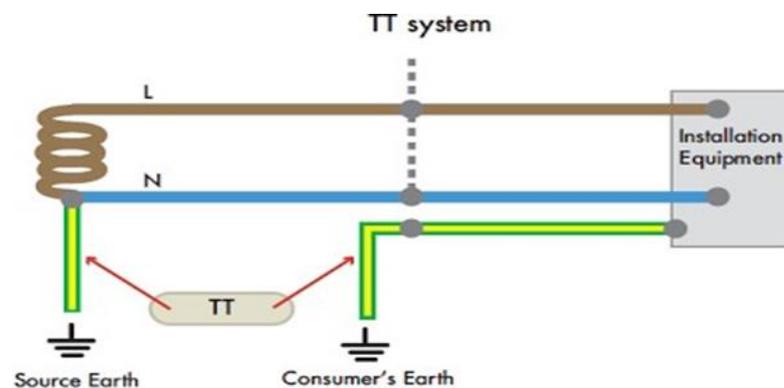
Gambar 2.6 TNC-S (Terre Neutral – Combined – Separate)

Sebuah sistem TN-C-S, memiliki saluran netral dari peralatan distribusi utama(sumber listrik) terhubung dengan bumi dan pembumian pada jarak tertentu disepanjang saluran netral yang menuju konsumen, biasanya disebut sebagai Protective Multiple Earthing (PME). Dengan sistim ini konduktor netral dapat berfungsi untuk mengembalikan arus gangguan pentanahan yang mungkin timbul

disisi konsumen (instlasi) kembali kesumber listrik. Pada sistim ini, instalasi peralatan pada konsumen tinggal menghubungkan pentanahannya pada terminal (saluran) yang telah disediakan oleh sumber listrik.

c. TT (Double Terre)

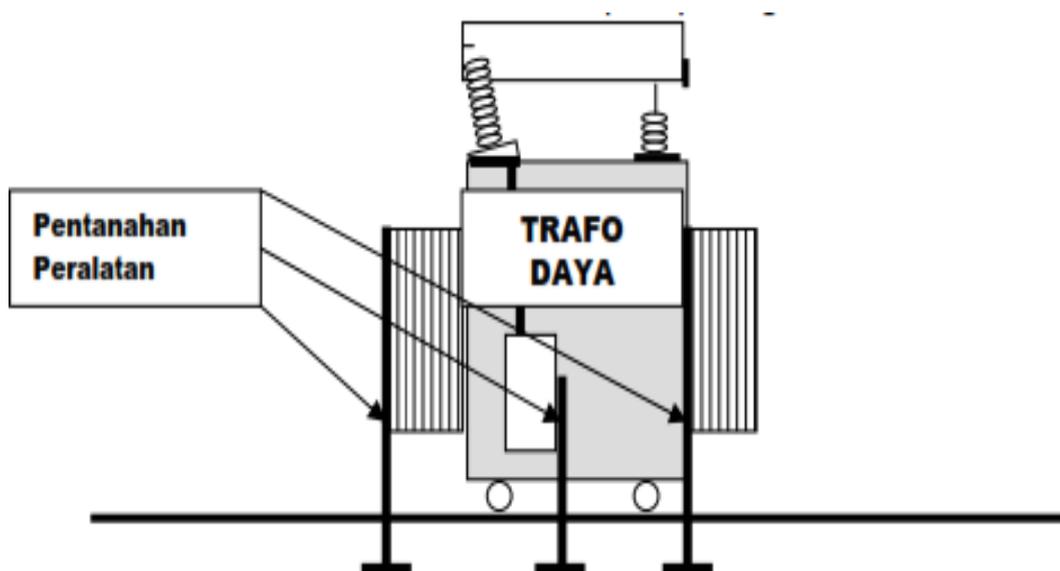
Pada sistem TT, bagian netral sumber listrik tidak terhubung langsung dengan pembumian netral pada sisi konsumen (instalasi peralatan). Pada sistim TT, konsumen harus menyediakan koneksi mereka sendiri ke bumi, yaitu dengan memasang elektroda bumi yang cocok untuk instalasi tersebut.



Gambar 2.7 TT (Double Terre)

2.5.2 Pentanahan peralatan ^[7]

Pentanahan peralatan adalah penghubungan 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 baik kondisi normal maupun saat terjadi gangguan. Yang dimaksud peralatan disini adalah bagian-bagian yang bersifat konduktif yang pada keadaan normal tidak bertegangan seperti bodi transformator, bodi PMT, bodi PMS, bodi motor listrik, dan sebagainya. Pentanahan yang demikian disebut pentanahan peralatan, berikut merupakan contoh pemasangan ditunjukkan seperti gambar dibawah ini:



Gambar 2.8 Pemasangan pentanahan peralatan

^[7] PT PLN (Persero) Pusat Pendidikan dan Pelatihan “*Grounding System*”

2.6 Tahanan Jenis Tanah ^[8]

Tahanan jenis tanah adalah sebuah faktor keseimbangan antara tahanan tanah dan kapasitansin disekitarnya yang di representasikan (disimbolkan) dengan ρ (rho) dalam sebuah persamaan matematik. Untuk menghitung nilai tahanan jenis tanah dapat menggunakan persamaan atau rumus berikut ini (metode *driven rod*):

$$\rho = \frac{2 \pi L R}{(\ln \frac{8L}{d} - 1)} \dots\dots\dots(2.1)^9$$

keterangan: ρ = tahanan jenis tanah (ohm)

$$\pi = \text{Phi } (3,14 / \frac{22}{7})$$

L = Kedalaman elektroda (m)

R = Tahanan pentanahan (Ω)

d = Diameter

Ln = Logaritma alami matematika

Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tidaklah sama. Beberapa faktor yang mempengaruhi tahanan jenis tanah yaitu:

2.6.1 Pengaruh keadaan struktur tanah

Kesulitan yang biasa dijumpai dalam mengukur tahanan jenis tanah adalah bahwa dalam kenyataannya komposisi tanah tidaklah homogeny pada seluruh volume tanah, dapat bervariasi secara vertikal maupun horizontal, sehingga pada lapisan tertentu mungkin terdapat dua atau lebih jenis tanah dengan tahanan jenis yang berbeda, oleh karena itu tahanan jenis tanah tidak dapat diberikan sebagai suatu nilai yang tetap. Untuk memperoleh harga sebenarnya dari tahanan jenis tanah, harus dilakukan pengukuran langsung ditempat dengan memperbanyak titik pengukuran.

Namun pada cara ini hanya baik untuk sementara, sebab proses penggaraman harus dilakukan secara periodic setidaknya enam bulan sekali. Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, pentanahan

^[8] Suswanto Daman. 2009. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Universitas Negeri Padang.

^[9] Arnando dkk. 2020. *Analisi Penngaruh Kedalaman Elektrode Prntanahan dengan menggunakan Metode Wenner dan Driven Rod*. Universitas Jambi.

dapat dilakukan dengan menanamkan elektroda pembumian sampai mencapai kedalaman dimana lebih dalam sehingga mencapai air tanah yang konstan, maka variasi tanah sangat besar, karena terkadang dipengaruhi oleh temperature dan kelembapan secara bervariasi.

Harga tahanan jenis tanah harus diambil untuk keadaan yang paling buruk yaitu sewaktu tanah dalam keadaan kering dan dingin. Untuk melihat gambaran mengenai besarnya tahanan jenis tanah untuk bermacam-macam jenis tanah dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 2.3 Tahanan jenis tanah

No	JENIS TANAH	TAHANAN JENIS TANAH (Ohm)
1	Rawa	30
2	Tanah liat	100
3	Pasir basah	200
4	Batu-batu kerikil basah	500
5	Pasir dan batu kerikil kering	1000
6	Batu	3000

Dalam penggunaannya data-data diatas sering terjadi kekeliruan karena komposisi tanah biasanya terdiri dari dua atau lebih kombinasi lapisan dari bermacam-macam tanah. Hal yang penting dalam penyelidikan karakteristik tanah ialah mencari tahanan jenis tanah. Harga tahanan jenis tanah ini selalu bervariasi sesuai dengan keadaan tanah pada saat pengukuran, pengukuran tahanan jenis tanah pada lokasi transformator diambil dari titik lokasi. Tahanan jenis tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus (metode *wenner*) yang tertulis:

$$\rho = 2.\pi.a.R.....(2.2)^{10}$$

Dimana :

ρ = Tahanan jenis rata-rata tanah (ohm-m)

a = Jarak antara batang elektroda yang terdekat (m)

R = Besar tahanan yang diukur (ohm)

2.6.2 Pengaruh zat kimia

Kandungan zat-zat kimia dalam tanah terutama sejumlah zat organik maupun anorganik yang dapat larut perlu untuk diperhatikan pula. Didaerah yang mempunyai tingkat curah hujan tinggi biasanya mempunyai tahanan jenis tanah yang tinggi disebabkan garam yang terkandung pada lapisan atas larut. Pada daerah yang demikian ini untuk memperoleh pentanahan yang efektif yaitu dengan menanam elektroda pada kedalaman yang lebih dalam dimana larutan garam masih terdapat.

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

2.6.3 Pengaruh iklim

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, pembedaan dapat dilakukan dengan menanam elektroda pembedaan sampai mencapai kedalaman dimana terdapat air tanah yang konstan. Kadangkala pembedaan elektroda pembedaan memungkinkan kelembaban dan temperatur bervariasi sehingga harga tahanan jenis tanah harus diambil untuk keadaan yang paling buruk, yaitu tanah kering dan dingin.

Proses mengalirnya arus listrik di dalam tanah sebagian besar akibat dari proses elektrolisa, oleh karena itu air di dalam tanah akan mempengaruhi konduktivitas atau daya hantar listrik dalam tanah tersebut. Dengan demikian tahanan jenis tanah akan dipengaruhi pula oleh besar kecilnya konsentrasi air tanah atau kelembaban tanah, maka konduktivitas daripada tanah akan semakin besar sehingga tahanan tanah semakin kecil.

2.6.4 Pengaruh temperature tanah

Temperatur tanah sekitar elektroda pbumian juga berpengaruh pada besarnya tahanan jenis tanah. Hal ini terlihat sekali pengaruhnya pada temperatur di bawah titik beku air (0°C), dibawah harga ini harga tahanan jenis tanah dengan cepat.

Gejala di atas dapat dijelaskan sebagai berikut ; pada temperatur di bawah titik beku air (0°C) , air di dalam tanah akan membeku, molekul-molekul air dalam tanah sulit untuk bergerak, sehingga daya hantar listrik tanah menjadi rendah sekali. Bila temperatur tanah naik, air akan berubah menjadi fase cair, molekul-molekul dan ion-ion bebas bergerak sehingga daya hantar listrik tanah menjadi besar atau tahanan jenis tanah turun.

2.7 Menghitung Tahanan Pentanahan ^[10]

Persamaan-persamaan untuk tahanan tanah dari berbagai sistem elektroda cukup rumit, dan dalam beberapa hal dapat dinyatakan dengan pendekatan-pendekatan. Semua pernyataan dalam persamaan-persamaan itu diperoleh dari hubungan $R = \rho L/a$ dan didasarkan pada asumsi bahwa tahanan tanah seragam pada seluruh volume tanah, kendati hal ini tidak mungkin/sangat jarang ada. Menurut standar PUIL nilai tahanan pbumian yang layak digunakan ialah dibawah 5 Ω. Rumus yang biasa digunakan untuk pasak tunggal dikembangkan oleh Prof. H.B. Dwight dar Institut Teknologi. Massachusetts yaitu:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \dots \dots \dots (2.3)^{10}$$

Dimana,

ρ = tahanan jenis tanah (ohm)

L = panjang pasak tanah (m)

a = jari-jari penampang pasak (m)

R = tahanan pasak ke tanah (ohm)

[10] Hutaaruk, T.S. 1991. “*Pengetanahan Netral Sistem Tenaga Dan Pengetanahan Peralatan*” Jakarta : Erlangga

$$\text{Nilai } x = \frac{L}{\left(\ln \frac{48 \cdot L}{a} \right) - 1} : d \dots \dots \dots (2.4)^4$$

Dimana :

L = Panjang elektroda (m)

a = Jari-jari elektroda (m)

d = Jarak antar elektroda (m)

x = Konstanta

Untuk mengetahui tahanan pentanahan dari 2 elektroda yang dipasang paralel dapat di peroleh dengan rumus dibawah ini:

$$\frac{\text{Tahanan 2 elektroda}}{\text{Tahanan elektroda tunggal}} = \frac{1 + x}{2} \dots \dots \dots (2.5)^4$$

Untuk mengetahui tahanan pentanahan dari 3 elektroda yang dipasang paralel dapat diperoleh dengan rumus dibawah ini:

$$\frac{\text{Tahanan 3 elektroda}}{\text{Tahanan elektroda tunggal}} = \frac{1+2x}{3} \dots \dots \dots (2.6)^4$$

Pasak jamak tersusun dalam segi empat kosong atau segi empat terisi, apabila jumlah pasak adalah N , maka:

$$\frac{\text{Tahanan } N \text{ Pasak paralel}}{\text{Tahanan elektroda tunggal}} = \frac{1+Kx}{N} \dots \dots \dots (2.7)^4$$

Dimana K adalah konstanta yang tergantung jumlah pasak, dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2.4 Tabel Nilai konstanta Elektroda Paralel

Jumlah pasak sepanjang sisi segi empat	Jumlah pasak seluruhnya	Harga K
Segi empat terisi		
2	4	2.7071
3	8	4.2583
4	12	5.3939
5	16	6.0072
6	20	6.4633
7	24	6.8363
8	28	7.1479
9	32	7.4195
10	36	7.6551
Segi empat kosong		
3	9	5.8917
4	16	8.5545
5	25	11.4371
6	36	14.0650
7	49	16.8933
8	64	19.5003
9	81	22.3069
10	100	24.9587

Sumber: As Pabla, dan Abdul Hadi. 1991. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta : Erlangga.

2.8 Pengaruh Yang Terjadi Terhadap Tahanan Tanah

2.8.1 Pengaruh ukuran pasak terhadap tahanan ¹¹

Apabila pasak ditanam lebih dalam ke tanah, maka tahanan akan berkurang. Secara umum dapat dikatakan, dua kali lipat lebih tahanan berkurang 40 %. Namun, bertambahnya diameter tanah pasak secara material tidak akan mengurangi tahanan. Dua kali lipat diameter misalnya, hanya mengurangi besarnya tahanan kurang dari 10%.

2.8.2 Pengaruh tahanan tanah terhadap tahanan elektroda

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

2.9 Arus Melalui Tubuh Manusia ¹²

Bila seseorang memegang penghantar yang diberi tegangan mulai dari harga nol dan dinaikkan sedikit demi sedikit, arus listrik yang melalui tubuh orang tersebut akan memberikan pengaruh. Mula mula akan merangsang syaraf sehingga akan terasa suatu getaran yang tidak berbahaya bila dengan arus bolak balik dan akan terasa sedikit panas pada telapak tangan bila dengan arus searah (arus persepsi) Bila tegangan yang menyebabkan terjadinya tingkat arus persepsi dinaikkan lagi maka orang akan merasa sakit dan kalau terus dinaikkan maka otot-otot akan kaku sehingga orang tersebut tidak berdaya lagi untuk melepaskan konduktor tersebut. Apabila arus yang melewati tubuh manusia lebih besar dari

As Pabla, dan Abdul Hadi. 1991. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta : Erlangga.

arus yang mempengaruhi otot dapat mengakibatkan orang menjadi pingsan bahkan sampai mati. Hal ini disebabkan arus listrik tersebut mempengaruhi jantung sehingga jantung berhenti bekerja dan peredaran darah tidak jalan sehingga dapat menyebabkan kematian. Kejadian itu disebut dengan *Vertricular Finrilation*.

Percobaan yang telah dilakukan oleh Danziel 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:

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots(2.8)^{10}$$

$$K = \sqrt{S_B} \dots\dots\dots(2.9)^{10}$$

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 dpat mentoleransi kejutan listrik dengan meghasilkan konstanta $S_B = 0,0135$, maka $k = 0,116$ dan $S_B = 0,0246$, maka $k = 0,157$ untuk manusia dengan berat badan 70 Kg. Sehingga dengan memasukkan nilai K pada (2.9) maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Untuk berat badan 50 Kg } I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots(2.10)^{10}$$

$$\text{Untuk berat badan 70 Kg } I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots(2.11)^{10}$$

2.9.1 Arus persepsi ¹²

Bila orang memegang penghantar yang diberi tegangan mulai dari nol dan dinaikkan sedikit, arus listrik yang melalui tubuh orang tersebut akan memberi

pengaruh. Mula-mula akan merangsang syaraf sehingga akan terasa suatu getaran yang tidak berbahaya, bila dengan arus bolak-balik. Tetapi bila dengan arus searah akan terasa sedikit panas pada telapak tangan.

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

- Untuk laki-laki : 1,1 mA.
- Untuk Perempuan : 0,7 mA.

2.9.2 Arus mempengaruhi otot ¹²

Bila tegangan yang menyebabkan terjadinya tingkat arus persepsi dinaikkan lagi maka orang akan merasa sakit dan kalau terus dinaikkan lagi maka otot-otot akan kaku sehingga orang tersebut tidak berdaya lagi untuk melepaskan konduktor yang dipegangnya itu.

Di *university of 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:

- Untuk laki-laki : 16 mA.
- Untuk Perempuan : 10,5 mA.

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

- Untuk laki-laki : 9 mA.
- Untuk Perempuan : 6 mA.

2.9.3 Batas aman arus melewati tubuh

Bahaya arus listrik yang mengalir ke dalam tubuh kita dipengaruhi oleh jenis dan kekuatan arus listrik, ketahanan tubuh terhadap arus listrik, jalur arus listrik ketika masuk ke dalam tubuh serta lamanya arus listrik yang mengalir di

dalam tubuh, maka semakin besar juga bahaya yang ditimbulkan.

Tabel 2.5 Pengaruh masuknya arus pada tubuh manusia ^[12]

No	Batas Arus (mA)	Pengaruh Pada Tubuh Manusia
1	0 – 0,9	Belum dirasakan pengaruhnya, tidak menimbulkan reaksi apa-apa.
2	0,9 – 1,2	Baru terasa adanya arus listrik, tetapi tidak menimbulkan akibat kejang, kontraksi atau kehilangan kontrol.
3	1,2 – 1,6	Mulai merasa seakan-akan ada yang merayap di tangan.
4	1,6 – 6,0	Tangan sampai kesiku merasa kesemutan.
5	6,0 – 8,0	Tangan mulai kaku, rasa kesemutan makin bertambah
6	13 - 15	Rasa sakit tidak tertahankan, penghantar masih dapat melepaskan dengan gaya yang besar sekali.
7	15 - 20	Otot tidak sanggup lagi melepaskan penghantar.
8	20 - 50	Dapat mengakibatkan kerusakan pada tubuh manusia.
9	50 - 100	Batas arus yang dapat menyebabkan kematian

Tabel 2.6 Besar dan lama tegangan sentuh maksimum ^[13]

No	Tegangan Sentuh (Volt) rms	Waktu Pemutusan Maksimum (S)
1	< 50	Tidak terhingga
2	50	1,0
3	75	0,5
4	90	0,2
5	110	0,2
6	150	0,1
7	220	0,05
8	280	0,03

^[12] Hutauruk, T.S. 1991. “*Pengetanahan Netral Sistem Tenaga Dan Pengetanahan Peralatan*” Jakarta : Erlangga

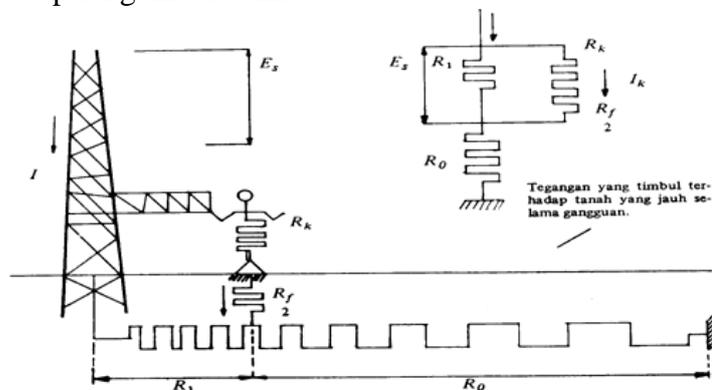
^[13] As Pabla, dan Abdul Hadi. 1991. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta : Erlangga.

2.9.4 Tahanan tubuh manusia

Tahanan tubuh manusia berkisar di antara 500 Ohm sampai 100.000 Ohm tergantung dari tegangan, keadaan kulit pada tempat yang mengadakan hubungan (kontak) dan jalannya arus dalam tubuh. Kulit yang terdiri dari lapisan tanduk mempunyai tahanan yang tinggi, tetapi terhadap tegangan yang tinggi kulit yang menyentuh konduktor langsung terbakar, sehingga tahanan dari kulit ini tidak berarti apa-apa. Tahanan tubuh manusia ini yang dapat membatasi arus. Berdasarkan hasil penyelidikan oleh para ahli maka sebagai pendekatan diambil harga tahanan tubuh manusia sebesar 1000 Ohm.

2.9.5 Tegangan sentuh¹⁴

Tegangan sentuh adalah tegangan yang terdapat diantara suatu objek yang disentuh dan suatu titik berjarak 1 meter, dengan asumsi bahwa objek yang disentuh dihubungkan dengan kisi kisi pengetanahan yang berada dibawahnya. Besar arus gangguan dibatasi oleh tahanan orang dan kontak ke tanah dari kaki orang tersebut seperti gambar berikut:



Gambar 2.9 Tegangan sentuh dengan rangkain pengganti

Dari rangkaian pengganti dapat dilihat hubungannya sebagai berikut:

$$E_s = \left[R_k + \frac{R_f}{2} \right] \times I_k \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

E_s = Tegangan sentuh (volt)

Hutauruk, T.S. 1991. "Pengetanahan Netral Sistem Tenaga Dan Pengetanahan Peralatan" Jakarta : Erlangga

R_k = Tahanan badan orang (= 1000 Ohm)

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

I_k = Besarnya arus yang melalui badan (ampere)

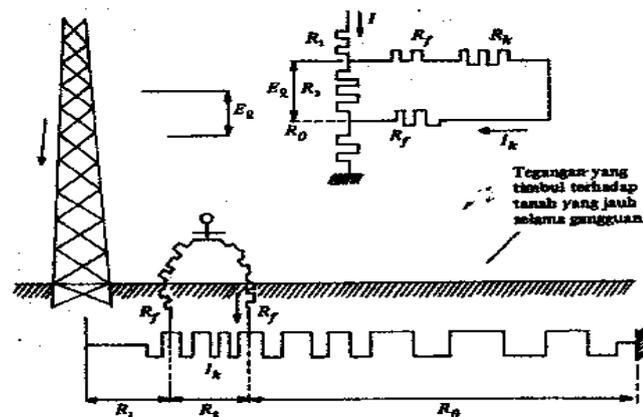
Table 2.7 Tegangan sentuh yang diizinkan dan lama gangguan

No	Lama gangguan t (Detik)	Tegangan sentuh yang diizinkan (Volt)
1	0,1	1.980
2	0,2	1.400
3	0,3	1.140
4	0,4	990
5	0,5	890
6	1,0	626
7	2,0	443
8	3,0	362

Sumber: Hutaaruk, T.S. 1991. "Pengetanahan Netral Sistem Tenaga Dan Pengetanahan Peralatan" Jakarta : Erlangga: 131.

2.9.6 Tegangan langkah¹⁵

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



Gambar 2.10 Tegangan langkah dekat peralatan yang diketanahkan

Dengan menggunakan rangkaian pengganti dapat ditentukan tegangan langkah sebagai berikut:

$$E_l = (R_k + 2 R_f) \times I_k \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

E_l = Tegangan langkah (volt)

R_k = Tahanan badan orang (ohm) = 1000 Ohm

R_f = Tahanan kontak ke tanag dari satu kaki (ohm) = $3 \rho_s$

t = waktu kejut (detik)

ρ_s = tahanan jenis tanah disekitar permukaan tanah (ohm meter)

Hutauruk, T.S. 1991. "Pengetanahan Netral Sistem Tenaga Dan Pengetanahan Peralatan" Jakarta : Erlangga

Tabel 2.8 Tegangan langkah yang diizinkan dan lama gangguan

No	Lama gangguan t (Detik)	Tegangan langkah yang diizinkan (Volt)
1	0,1	7.000
2	0,2	4.950
3	0,3	4.040
4	0,4	3.500
5	0,5	3.140
6	1,0	2.216
7	2,0	1.560
8	3,0	1.280

Sumber : Hutaeruk, T.S. 1991. "*Pengetanahan Netral Sistem Tenaga Dan Pengetanahan Peralatan*" Jakarta : Erlangga : 133.