



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Arus Melalui Tubuh Manusia

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

1. Arus mulai terasa atau persepsi (perception current)
2. Arus mempengaruhi otot (Let-go current)
3. Arus mengakibatkan pingsan atau mati atau arus fibrilasi (fibrating current)
4. Arus Reaksi (Reaction current)

2.1.1 Arus Persepsi

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. Dimana pada pengujian yang dilakukan didapat arus rata-rata persepsi sebagai berikut :

1. Untuk Laki-Laki = 1,1 mA
2. Untuk Perempuan = 0,7 mA



2.1.2 Arus Mempengaruhi otot

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. Dimana pada pengujian yang dilakukan didapat arus rata-rata mempengaruhi otot sebagai berikut :

1. Untuk Laki-Laki = 16 mA
2. Untuk Perempuan = 10,5 mA

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

1. Untuk Laki-Laki = 9 mA
2. Untuk Perempuan = 6 mA

2.1.3 Arus Fibrilasi

Apabila arus yang melewati tubuh manusia lebih besar dari 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. Untuk menyelidiki keadaan ini tidak mungkin dilakukan terhadap manusia.

2.1.4 Arus Reaksi

Arus reaksi adalah arus yang terkecil yang dapat mengakibatkan orang menjadi terkejut, hal ini cukup berbahaya karena dapat mengakibatkan kecelakaan sampingan. Karena terkejut orang dapat jatuh dari tangga melemparkan peralatan yang sedang dipegang yang dapat mengenai bagian-bagian instalasi bertegangan tinggi sehingga terjadi kecelakaan yang lebih fatal. Penyelidikan yang terperinci telah dikemukakan oleh DR.Hanz Prinz dimana batasan – batasan arus tersebut disusun menurut tabel 2.1.



Tabel 2.1 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 didalam tangan.
1,6 – 6,0 mA	Tangan sampai kesiku 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.

Sumber : (Hutauruk 'Pengetanahan netral sistem tenaga dan pentanahan peralatan' 1991:136)

2.2 Tahanan Tubuh Manusia

Tahanan tubuh manusia berkisar di antara 500Ω sampai 100.000Ω 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. Penyelidikan dan penelitian tahanan tubuh manusia yang diperoleh beberapa orang ahli adalah sebagai berikut :



Tabel 2.2 Berbagai harga tahanan tubuh manusia

Peneliti	Tahanan(ohm)	Keterangan
Dalziel	500	Dengan tegangan 60 cps.
AIEE Committee Report	2.330	Dengan tegangan 21 volt.
1958		Tangan ke tangan $I_K = 9 \text{ mA}$
	1.130	Tangan ke kaki .
	1.680	Tangan ke tangan dengan arus searah.
	800	Tangan ke kaki dengan 50 cps.
Laurent	3.000	

Sumber : (Hutauruk 'Pengetanahan netral sistem tenaga dan pentanahan peralatan' 1991:136)

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

2.3 Karakteristik Tanah

Karakteristik tanah merupakan salah satu faktor yang mutlak diketahui karena mempunyai kaitan erat dengan perencanaan dan sistem pentanahan yang akan digunakan. Sesuai dengan tujuan pentanahan bahwa arus gangguan harus secepatnya terdistribusi secara merata ke dalam tanah, maka penyelidikan tentang karakteristik tanah sehubungan dengan pengukuran tahanan dan tahanan jenis tanah merupakan faktor penting yang sangat mempengaruhi besarnya tahanan pentanahan. Pada kenyataannya tahanan jenis tanah harganya bermacam-macam, tergantung pada komposisi tanahnya dan faktor faktor lain.

Untuk memperoleh harga tahanan jenis tanah yang akurat diperlukan pengukuran secara langsung pada lokasi pembangunan gardu induk karena struktur tanah yang sesungguhnya tidak sederhana yang diperkirakan. Pada suatu lokasi tertentu sering dijumpai beberapa jenis tanah yang mempunyai tahanan jenis yang berbeda-beda (non uniform). Pada pemasangan sistem



pentanahan dalam suatu lokasi gardu induk, tidak jarang peralatan pentanahan tersebut ditanam pada dua atau lebih lapisan tanah yang berbeda yang berarti bahwa tahanan jenis tanah di tempat itu tidak sama. Apabila lapisan tanah pertama dari sistem pentanahan mempunyai tahanan jenis sebesar r_1 sedangkan lapisan bawahnya dengan tahanan jenisnya adalah r_2 , maka diperoleh faktor refleksi K seperti pada persamaan :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Dari rumus di atas memungkinkan faktor refleksi K berharga positif atau negatif.

2.4 Tahanan Jenis Tanah

Faktor keseimbangan antara tahanan pentanahan dan kapasitansi disekelilingnya adalah tahanan jenis tanah yang direpresentasikan dengan ρ (rho). Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung pada factor di bawah ini :

1. Jenis tanah : tanah liat, berbatu, dan lain – lain.
2. Lapisan tanah berlapis – lapis dengan tahanan.
3. Kelembaban tanah.
4. Temperatur.

Tahanan jenis tanah bervariasi dari 500 sampai 50.000 Ω per cm^3 . Kadang – kadang harga ini dinyatakan dengan harga ohm per cm pernyataan ohm per cm mempersentasikan tahanan antara dua permukaan yang berlawanan dari suatu volume tanah berisi 1cm^3 . Untuk mengubah komposisi kimia tanah dapat dilakukan dengan memberikan garam pada tanah dekat elektroda pentanahan dengan maksud mendapatkan tahanan jenis tanah yang rendah. Cara ini hanya baik untuk sementara sebab pengaraman harus dilakukan secara periodik, sedikitnya 6 (enam) bulan sekali. Dengan membasahi tanah juga megubah tahanan jenis tanah.

Harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangatlah tergantung dengan keadaan cuaca. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata –



rata, maka diperlukan suatu perencanaan maka diperlukan pengukuran dalam jangka waktu tertentu misalnya selama 1(satu) tahun .

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim pentahanan dapat dilakukan dengan menanamkan elektroda pentahanan mencapai kedalaman dimana terdapat air yang konstan .

Pada pentanahan yang tidak mungkin atau tidak perlu ditanam lebih dalam sehingga mencapai air tanah yang konstan, variasi tahanan jenis tanah sangat besar penanaman memungkinkan kelembaban dan temperatur bervariasi, harga tahanan jenis tanah harus diambil pada keadaan yang paling buruk, yaitu tanaman kering dan dingin.

Setelah memperoleh harga tahanan jenis tanah, dan biasanya diambil harga yang tertinggi, maka berdasarkan harga tahanan jenis tanah tersebut dibuat perencanaan pentanahan pengukuran tahanan jenis tanah harus dilakukan terlebih dahulu.

2.4.1 Sifat Geologi Tanah

Ini merupakan Faktor utama yang menentukan tahanan jenis tanah Bahkan dasar dari pada tanah relatif bersifat bukan penghantar. Tanah liat umumnya mempunyai tahanan jenis terendah, sedangkan batu batuan dan qartz bersifat insulator.

Tabel 2.3 Tahanan Jenis Tanah

Jenis tanah	Tahanan pada tanah ohm-cm
Sawah , rawa	3.000
Tanah liat dan tanah ladang	10.000
Pasir basah	20.000
Kerikil basah	50.000
Pasir dan kerikil kering	100.000
Tanah berbatu	300.000

Sumber : (PUIL 2000)



2.4.2 Komposisi Zat Kimia Dalam Tanah

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 masih terdapat larutan garam.

2.4.3 Kandungan air tanah

Kandungan air tanah sangat berpengaruh terhadap perubahan tahanan jenis tanah (p) terutama kandungan air tanah sampai dengan 20 %. Dalam salah satu test laboratorium untuk tanah merah penurunan kandungan air tanah dari 20% ke 10% menyebabkan tahanan jenis tanah naik sampai 30 kali. Kenaikan kandungan air tanah diatas 20% pengaruhnya sedikit sekali.

2.4.4 Temperatur tanah

Temperatur bumi pada kedalaman 5 feet (=1,5 m) biasanya stabil terhadap perubahan temperatur permukaan. Bagi Indonesia daerah tropis perbedaan temperature selama setahun tidak banyak, sehingga faktor temperatur boleh dikatakan tidak ada pengaruhnya.

2.4.5 Pengaruh Musim

Pengaruh musim akan mempengaruhi jumlah kandungan air didalam tanah. Jadi secara tidak langsung pengaruh musim akan mempengaruhi besar kecilnya tahanan jenis tanah. Selain hal –hal tersebut diatas pada kenyataanya bahwa tanah itu sendiri dan lapisan – lapisan dengan resistansi nyang berbeda – beda. Faktor – faktor tersebut diatas tidak dapat dirumuskan dengan pasti, sehingga besaran resistansi yang tepat harus didapat dengan cara pengukuran setempat.



2.4.6 Pengaruh Kelembapan

Harga jenis tahanan tanah sangat dipengaruhi oleh konsentrasi air tanah. Pada kelembapan tanah yang rendah tahanan jenis tanah besar, sebaliknya semakin besar konsentrasi air didalam tanah, maka harga tahanan jenis tanah akan semakin kecil. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Proses mengalirnya arus listrik kedalam tanah sebagian besar adalah proses elektrolisis maka dari konsentrasi air didalam tanah akan mempengaruhi konduktivitas atau daya hantar listrik kedalam tanah tersebut. Dengan demikian tahanan jenis tanah akan dipengaruhi oleh besarnya konsentrasi air tanah. Semakin besar konsentrasi air dalam tanah maka konduktivitas air didalam tanah semakin besar. Tanah yang kering atau tanah dengan konsentrasi air dalam tanahnya rendah sekali (dibawah 10 %) mempunyai tahanan jenis besar sekali.

2.5 Tanah dan pengaman

Untuk memahami mengapa tahanan tanah harus rendah, kita gunakan hukum ohm, yaitu $E = I \times R$ (dimana E adalah tegangan dalam volt, I adalah arus dalam ampere, dan R adalah tahanan dalam ohm).. Hubungan tahanan listrik badan manusia (dewasa dengan kulit kering) dengan tegangan adalah tidak linier dan untuk arus searah atau frekuensi sampai 100 Hertz, dapat dilihat pada tabel 2.4 :

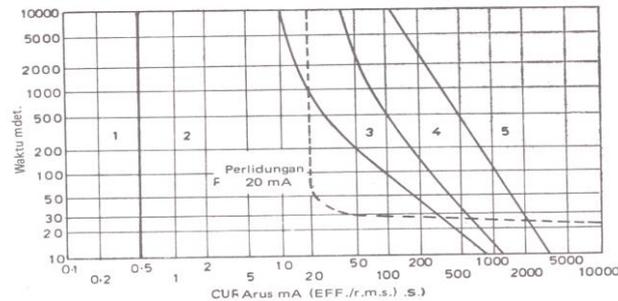
Tabel 2.4 Potensial – potensial aman sentuh

Tegangan sentuh rms (V)	Tahanan Listrik Badan Manusia (ohm)
25	2500
50	2000
250	1000
Harga asimtot	650

Sumber: (Pabla A.S ‘Sistem distribusi daya listrik’ 1991:156)

Besaran arus lewat badan, maksimum 10 mA untuk pria dan 8 mA untuk wanita, adalah besaran – besaran yang telah ditetapkan sebagai patokan. Arus 100 mA atau lebih dinyatakan adalah fatal. Publikasi IEC 479 “ Pengaruh – pengaruh

arus yang melewati badan manusia” memuat grafik (gambar2.1) yang memperlihatkan daerah berbahaya yang diakibatkan.



Gambar 2.1 Pengaruh akibat arus melewati badan manusia : Daerah – daerah 1,2, dan 3 ; bahaya mati oleh sengatan listrik praktis terhindar. Daerah – daerah 4 dan 5 : bahaya mati oleh sengatan listrik (Pabla A.S ‘Sistem distribusi daya listrik’ 1991:156)

Oleh sentuhan terhadap sumber arus bolak balik 50 / 60 Hz oleh orang dewasa. Apabila arus yang melewati badan manusia dapat dibatasi dalam besaran dan waktu seperti pada daerah – daerah satu, dua dan tiga, maka bahaya mati oleh sengatan listrik dalam keadaan normal dapat dihindari. Namun, dalam beberapa hal intensitas kejutan dapat berakibat orang jatuh atau terlempar, yang dapat menyebabkan cedera, IEC364 memberikan batas waktu maksimum pemutusan hubungan terhadap sentuhan dengan tegangan, seperti terlihat tabel 2.5:

Tabel 2.5 Tenggang waktu maksimum sentuhan tegangan

Tegangan yang mungkin tersentuh (V)	Waktu maksimum pemutusan hubungan (detik)
< 50	Tidak terhingga
50	5
75	1
90	0,5
110	0,2
150	0,1
220	0,05
280	0,03

Sumber: (Pabla A.S ‘Sistem distribusi daya listrik’ 1991:157)



2.6 Sistem Pentanahan

Pentanahan (Grounding) adalah merupakan suatu mekanisme dimana daya listrik dihubungkan langsung dengan tanah (Bumi). Seperti kita ketahui bersama bahwa arus listrik terjadi jika ada perbedaan potensial di antara 2 (dua) buah titik (Node). Arus listrik selalu mengalir dari titik yang mempunyai energi potensial (E_p) yang lebih tinggi ke titik yang mempunyai energi potensial rendah. Hal ini terjadi rendah ke titik yang mempunyai E_p yang lebih tinggi.

Energi listrik atau biasa disebut dengan daya listrik (P) yang notabene adalah merupakan hasil perkalian antara tegangan listrik (V) dengan arus listrik (I) selalu akan mengalir ke titik yang mempunyai tahanan atau rintangan atau hambatan (R) yang paling besar. Dengan demikian ternyata bahwa arus listrik akan mengalir jika ada hambatan atau rintangan yang menghalang diantara 2 titik yang berbeda. Dengan adanya rintangan atau hambatan yang ada akan menyebabkan terjadinya perbedaan potensial pada masing masing titik, sehingga menyebabkan terjadinya arus listrik (I) diantara kedua titik tersebut.

Dengan adanya pengalaman seperti diatas, maka manusia selalu berusaha untuk membuat sistem pentanahan dengan mengusahakan jumlah tahanan diantara kedua titik yang saling berhubungan agar menjadi sekecil mungkin (Mendekati nilai nol). Agar melindungi perangkat kita bahkan bila perlu diisolasi secara total saja kedua titik tersebut (Misalnya tower dan perangkat internal lainnya) dengan pemikiran pasti lebih aman karena tidak ada kontak fisik secara langsung. Suatu kesalahan yang terbesar karena akan menimbulkan jumlah tahanan atau rintangan diantara kedua titik tersebut menjadi semakin besar yang artinya sesuai pengalaman yang dimaksudkan diatas akan mengakibatkan arus listrik akan secara mengalir dalam jumlah yang besar pula karena dibatasi oleh waktu dan besarnya tahanan yang ada untuk segera menyamakan perbedaan potensi diantara kedua titik tersebut agar sama jumlahnya.

Tujuan utama dari adanya pentanahan adalah menciptakan jalur yang low impedance (Tahanan rendah) terhadap permukaan bumi untuk gelombang listrik dan transient voltage. Penerangan, arus listrik, circuit switching dan electrostatic



discharge adalah penyebab umum dan adanya sentakan listrik atau transient voltage. Sistem pentanahan yang efektif akan meminimalakan efek tersebut.

Salah satu faktor kunci dalam setiap usaha pengamanan (Perlindungan) rangkaian listrik adalah pentanahan. Apabila suatu tindakan pengamanan atau perlindungan yang baik akan dilaksanakan, maka harus ada sistem pentanahan yang dirancang dengan benar. Bagian bagian sistem pentanahan mempunyai bagian-bagian sebagai berikut :

1. Kutub pentanahan atau elektroda adalah suatu komponen yang terbuat dari bahan metal yang berfungsi sebagai bahan penghantar listrik yang bersentuhan dengan tanah atau ditanam didalam tanah dengan tujuan untuk mempercepat penyerapan muatan listrik akibat arus bocor atau tegangan lebih kedalam tanah.
2. Terminal pentanahan adalah terminal atau titik dimana kita hubungkan dengan perangkat kita. Biasanya berupa lempeng tembaga cukup panjangnya 15 cm, lebar 3 cm, dan tebal 1 cm.

Agar sistem pentanahan dapat bekerja efektif, harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut :

1. Membuat jalur impedansi rendah ketanah untuk pengaman personil dan peralatan, menggunakan rangkaian yang efektif
2. Dapat melawan dan menyebabkan gangguan berulang dan arus akibat surja hubung (surge currents)
3. Menggunakan bahan tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah untuk meyakinkan kontinuitas penampilannya sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
4. Menggunakan Sistem mekanik yang kuat namun mudah didalam pelayanan.
(Pabla A.S 'sistem distribusi daya listrik' 1991 : 154).

2.7 Teori Pentanahan

Fungsi dari pentanahan adalah untuk membatasi tegangan yang timbul diantara satu peralatan yang lain, peralatan dengan tanah, dan meratakan tegangan yang timbul pada permukaan tanah akibat arus kesalahanyang mengalir dalam



tanah. Batas – batas tegangan yang diizinkan ialah tegangan yang cukup aman bagi orang yang berada disekitarnya. Untuk merencanakan suatu sistem pentanahan harus diperhatikan beberapa faktor, antara lain :

1. Besarnya arus kesalahan yang mungkin terjadi.
2. Luasnya tanah yang dapatdigunakan untuk pentanahan.
3. Tahanan jenis tanah.
4. Bentuk dan ukuran serta jenis konduktor yang dipakai sebagai elektroda pentanahan.

Tujuan utama dari adanya pentanahan adalah menciptakan jalur yang low-impedance (tahanan rendah) terhadap permukaan bumi untuk gelombang listrik dan transient voltage. Penerangan, arus listrik, circuit switching dan electrostatic discharge adalah penyebab umum dari adanya sentakan listrik atau transient voltage. Sistem pentanahan yang efektif akan meminimalkan efek tersebut.

Menurut **IEEE Std 142™-2007**, tujuan sistem pentanahan adalah :

1. Membatasi besarnya tegangan terhadap bumi agar berada dalam batasan yang diperbolehkan
2. Menyediakan jalur bagi aliran arus yang dapat memberikan deteksi terjadinya hubungan yang tidak dikehendaki antara konduktor sistem dan bumi. Deteksi ini akan mengakibatkan beroperasinya peralatan otomatis yang memutuskan suplai tegangan dari konduktor tersebut.

2.8 Sifat-sifat dari sebuah sistem elektroda tanah

Hambatan arus melewati sistem elektroda tanah mempunyai tiga komponen yaitu :

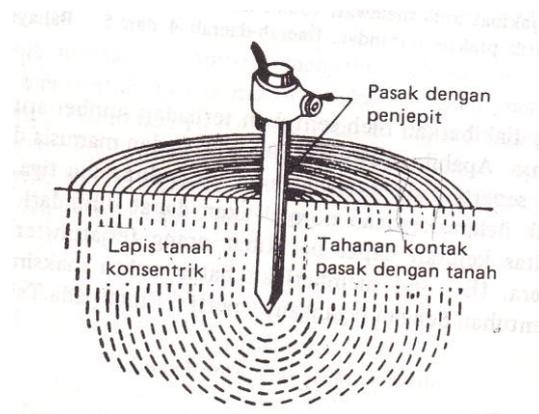
1. Tahanan pasaknya sendiri dan sambungan – sambungannya.
2. Tahanan kontak antara pasak dengan tanah sekitar.
3. Tahanan tanah disekelilingnya.

Pasak – pasak tanah, batang – batang logam, struktur dan peralatan lain biasa digunakan untuk elektroda tanah. Elektroda – elektroda ini umumnya besar

dan penampangnya sedemikian, sehingga tahananya dapat diabaikan terhadap tahanan keseluruhan sistem pentanahan.

Tahanan antara elektroda dan tanah jauh lebih kecil dari yang biasa 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. Marilah kita tinjau suatu elektroda (pasak) yang ditanam ditanah yang terdiri atas lapisan – lapisan tanah dengan ketebalan yang sama.



Gambar 2.2 komponen – komponen tahanan elektroda tanah (Pabla A.S ‘Sistem distribusi daya listrik’ 1991:157)

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. Jarak ini disebut daerah tahanan efektif, yang juga sangat tergantung pada kedalaman pasak. Dari ke-3 macam komponen tahanan, tahanan tanah merupakan besaran yang paling kritis dan paling sulit dihitung ataupun diatasi.



2.8.1 Menghitung tahanan tanah

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 atau sangat jarang ada. Rumus yang biasa digunakan untuk pasak tunggal dikembangkan oleh professor H.B.Dwight dari institute teknologi massa chusetts yaitu :

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

Dimana : ρ = Tahanan rata – rata tanah (ohm-cm)

L = Panjang pasak tanah (cm)

a = jari-jari penampang (cm)

R = Tahanan pasak ke tanah (ohm)

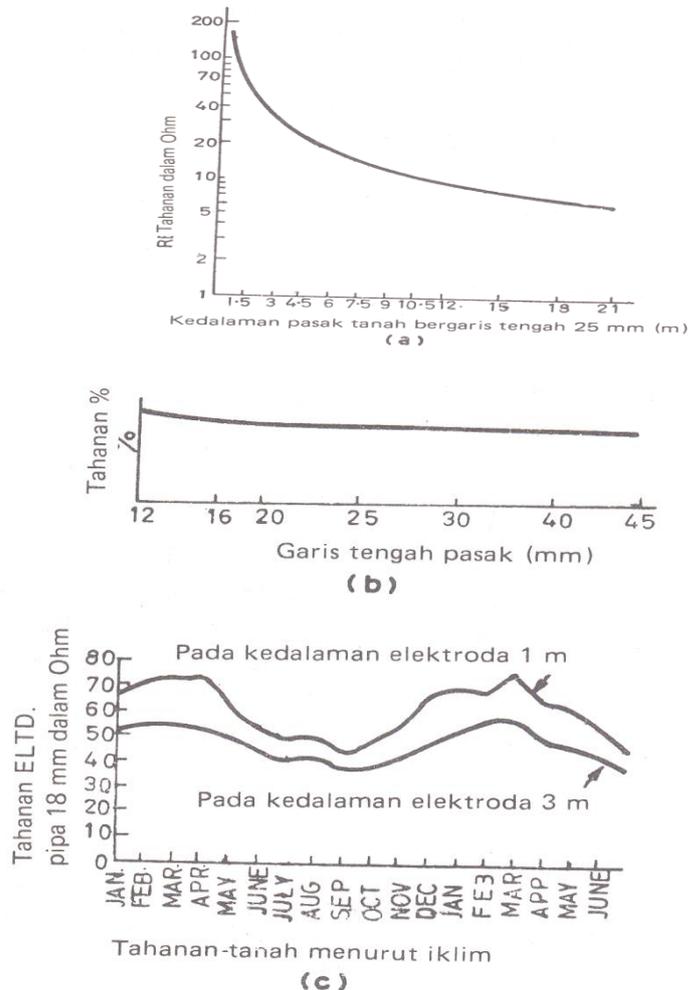
2.8.2 Pengaruh ukuran pasak terhadap tanah

Apabila pasak ditanam lebih dalam ke tanah, maka tahanan akan berkurang. Secara umum dapat dikatakan, dua kali lipat lebih dalam tahanan berkurang 40% (Gambar 2.3a). Namun, bertambahnya diameter pasak secara material tidak akan mengurangi tahanan. Dua kali lipat diameter misalnya, hanya mengurangi besarnya tahanan kurang dari 10%.

2.8.3 Pengaruh tahanan tanah terhadap tahanan elektroda

Rumus Dwight menunjukkan, bahwa tahanan elektroda pentanahan ketanah 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 beberapa pasak harus ditanam agar diperoleh tahanan yang rendah. Tahanan tanah sangat bervariasi diberbagai tempat, dan berubah menurut iklim.

Karena tahanan tanah berkaitan langsung dengan kandungan air dan suhu, maka dapat saja diasumsikan bahwa tahanan pentanahan suatu sistem akan berubah sesuai perubahan iklim setiap tahunnya. Variasi – variasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.5c. Karena kandungan air dan suhu stabil pada kedalaman yang lebih besar, maka agar dapat bekerja efektif sepanjang waktu, sistem pentanahan dapat dikonstruksi dengan pasak tanah yang ditancapkan cukup dalam di bawah permukaan tanah. Hasil terbaik akan diperoleh apabila kedalam pasak mencapai tingkat kandungan air yang tetap.



Gambar 2.3 Variasi – variasi tahanan tanah menurut : A) Kedalaman pasak tanah bergaris B) menurut garis tengah pasak C) Menurut iklim (Pabla A.S ‘ Sistem Distribusi Daya Listrik ‘ 1991: 160)



2.8.4 Ukuran – ukuran penghantar tanah.

Penghantar – penghantar dan elektroda – elektroda baja digunakan untuk saluran distribusi dan saluran pentanahan. Luas minimum penghantar yang diperlukan dapat dicari dengan rumus empiris berikut ini:

$$\begin{aligned}\text{Luas dalam mm}^2 &= 12,15 \times 10^{-3} I / \sqrt{t} \text{ untuk sambungan yang dilas} \\ &= 15,7 \times 10^{-3} I / \sqrt{t} \text{ untuk sambungan dengan skrup}\end{aligned}$$

Dimana :

I = Arus gangguan dalam ampere

T = lamanya terjadi gangguan, biasanya diambil 3 dari 5

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

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

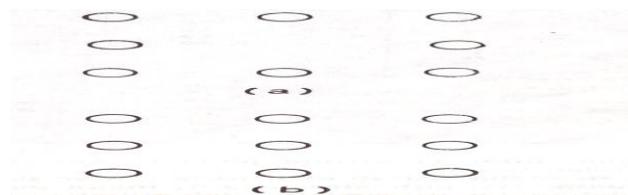
Dibandingkan dengan sambungan sekrup, pada sambungan las dapat timbul sedikit korosi pada sambungan oleh bahan las atau teknik pengelasannya sendiri. Hindari car las titik dan gunakan las kontinyu. Penghantar dapat dipilih dari ukuran – ukuran standar seperti $10 \times 6 \text{ mm}^2$, $20 \times 6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

2.8.5 Perencanaan elektroda – elektroda pentanahan

Elektroda – elektroda pentanahan untuk sistem distribusi - 33 kV umumnya adalah batas MS ukuran minimum dengan garis tengah 20 mm atau pipa GI bergaris tengah 25 mm sepanjang 3 m (dengan pertimbangan kekuatan terhadap mekanis dan korosi) ditanam ke tanah dengan kedalaman 0,5 – 0,75 m dari permukaan tanah. Pasak panjang dan ditancapkan lebih dalam sangat bermanfaat dalam mengurangi tahanan tanah. Ditempat (dengan tahanan tinggi) di mana tahanan pentanahan diperoleh dengan konstruksi diatas melampaui harga batas yang ditentukan, maka dibuat elektroda jamak. Dalam hal ini digunakan 2 elektroda, hubungan elektroda dibuat dengan plat strip MS dengan ukuran yang sama dengan penghantar pentanahan, dan jarak antara elektroda tidak boleh kurang dari 2 kali panjang elektroda. Apabila masih diperlukan elektroda ketiga, maka elektroda ketiga harus ditempatkan sedemikian rupa sehingga tiga buah elektroda membentuk segitiga sama sisi, dengan panjang sisinya tidak boleh kurang dari 2 kali panjang elektroda. Untuk praktisnya, tahanan dari dua atau tiga pasak dapat dihitung parallel, dan tahanan total menjadi setengah atau sepertiga dari tahanan tanah dengan menggunakan pasak tunggal. Kadang – kadang jarak antar elektroda tidak dapat dibuat besar untuk itu ada rumus empiris penentuan tahanan total dari berbagai macam susunan parallel, seperti dibawah ini :

(A) Dua pasak dipasang parallel

$$\frac{\text{Tahanan 2 pasak paralel}}{\text{tahanan pasak tunggal}} = \frac{1+X}{2} \dots\dots\dots(2.1)$$



Gambar 2.4 Elektroda tanah : (a) Dalam susunan segi empat kosong.
(b) Dalam susunan segi empat berisi.



(B) Tiga pasak parallel berbentuk segitiga sama sisi dengan sisi = d

$$\frac{\text{Tahanan 3 pasak paralel}}{\text{tahanan pasak tunggal}} = \frac{1+2x}{3} \dots\dots\dots(2.2)$$

(C) Pasak jamak tersusun dalam segi empat kosong atau segi empat terisi seperti terlihat pada gambar 2.5, apabila jumlah pasak adalah N :

$$\frac{\text{Tahanan pasak paralel}}{\text{tahanan pasak tunggal}} = \frac{1+kx}{N} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana k adalah konstanta yang tergantung jumlah pasak, yang dapat dilihat pada tabel 2.6 konstanta yang tergantung pada jumlah atau banyaknya suatu pasak yaitu :

Tabel 2.6 Konstanta Tergantung Jumlah Pasak

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: (Pabla A.S ‘Sistem distribusi daya listrik’ 1991:164)



2.9 Faktor – faktor yang menentukan tahanan pentanahan

Tahanan suatu pentanahan elektroda tergantung dari tiga faktor berikut yaitu:

1. Tahanan elektroda itu sendiri dan penghantar yang menghubungkan ke peralatan yang ditanahkan.
2. Tahanan kontak antara elektroda dengan tanah.
3. Tahanan dari massa tanah sekeliling elektroda.

Namun demikian pada prakteknya tahanan elektroda dapat diabaikan. Akan tetapi tahanan kawat penghantar yang menghubungkan ke peralatan akan mempunyai impedansi yang tinggi terhadap impuls frekuensi tinggi seperti pada saat terjadi lightning discharge. Untuk menghindarinya sambungan ini diusahakan dibuat sependek mungkin. Tiga faktor tersebut diatas yang dominan pengaruhnya adalah tahanan sekeliling elektroda atau dengan kata lain tahanan jenis tanah (ρ).

2.10 Elektroda Pentanahan

Dalam sistem pentanahan sangat diperlukan elektroda pentanahan, yaitu bentuk elektroda yang digunakan dipilih sedemikian rupa sehingga tahanan pentanahan yang dihasilkan sekecil mungkin sampai pada harga yang diizinkan. Untuk mendapatkan tahanan pentanahan yang serendah mungkin elektroda pentanahan memiliki beberapa persyaratan yang harus dipenuhi dari suatu elektroda pentanahan yaitu :

1. Tahanan elektroda pentanahan harus lebih kecil daripada harga yang direkomendasikan.
2. Elektroda pentanahan harus mampu dialiri oleh hubungan singkat yang besar
3. Elektroda pentanahan mempunyai sifat kimia yang baik sehingga tidak mudah mengalami korosi.
4. Elektroda pentanahan mempunyai sifat mekanis yang baik.

Bahan konduktor merupakan bahan yang digunakan elektroda pentanahan, berdasarkan ketentuan maka bahan tersebut adalah besi, aluminium, dan tembaga. Dari ketiga jenis bahan tersebut ditinjau dari sifat mekanis, elektris, dan kimiawi dan tembaga mempunyai keunggulan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan yang lain, namun ditinjau dari segi biaya tembaga lebih mahal, tetapi



mengingat kesulitan yang timbul bila elektroda tersebut mengalami kerusakan baik karena pengaruh listrik, mekanis, dan kimiawi maka tembaga lebih unggul.

Pada umumnya elektroda – elektroda pentanahan ditanam sejajar satu sama lainnya, dalam beberapa puluh sentimeter kedalam tanah. Untuk memperkecil harga tahanan pentanahannya, diperluas didaerah pentanahan, karena cara ini mudah dibandingkan dengan cara memperdalam konduktor.

Ada beberapa macam bentuk elektroda yaitu :

1. Elektroda batang

Elektroda bentuk batang ini tersebut dari pipa atau profil. Elektroda ini ditanam tegak lurus dalam tanah, elektroda batang yang digunakan ini memiliki bentuk L,U dan T yang digalvanisasikan. Biasanya dibuat dari bahan tembaga, stainless steel atau galvanised steel. Perlu diperhatikan dalam pemilihan bahan agar terhindar dari galvanic couple yang dapat menyebabkan korosi. Elektroda batang ini mampu menyalurkan arus discharge petir maupun untuk pemakaian pentanahan.

Ukuran elektroda batang yang biasa dipakai pada umumnya adalah sebagai berikut:

Diameter : 5/8 ”- 3/4 ”

Panjang : 4 – 8 feet

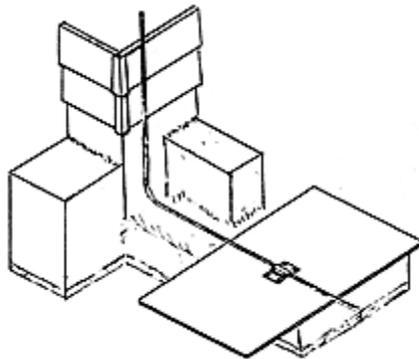


Gambar 2.5 Bentuk Elektroda Batang (google.com/Grounding System, Diktat Kuliah AMG/03042014)

2. Elektroda Plat

Elektroda berbentuk plat ini terdiri dari sebuah plat yang di hipersink dengan tebal 3 mm. plat ini ditanam tegak lurus dengan tanah. Sisi plat bagian atas paling sedikit arus 1 m dibawah permukaan tanah. Makin banyak jumlah plat diparalelkan dalam arde itu makin kecil tahanan arde itu, dan plat yang terpasang itu jaraknya satu sama lain paling sedikit 3mm. Cara penanaman biasanya secara vertical, sebab dengan menanam

secara horizontal hasilnya tidak berbeda jauh dengan vertical. Penanaman secara vertical adalah lebih praktis dan ekonomis.



Typical use on downlead cable

Gambar 2.6 Gambar elektroda plat (google.com/Grounding System, Diktat Kuliah AMG/03042014)

3. Elektroda Pita

Elektroda pita adalah elektroda yang dibuat dari bentuk penghantar yang berbentuk pita atau berpenampang, bulat atau penghantar pilin yang ada umumnya ditanam secara dangkal. Pada prakteknya, untuk penanaman makin dalam akan didapati kandungan air yang lebih besar sehingga akan diperoleh tahanan pentanahan yang kecil. Penanaman lebih dalam menyebabkan pula tahanan tanah lebih stabil dan lebih aman terhadap kerusakan yang mungkin terjadi. Oleh karena itu elektroda pita biasanya ditanam pada kedalaman 60 cm dibawah permukaan tanah.

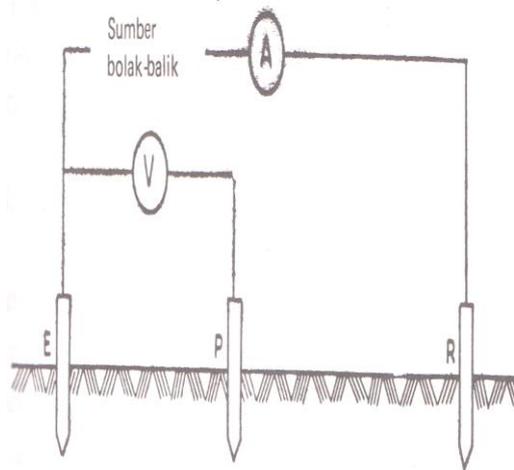


Gambar 2.7 Gambar elektroda pita (google.com/Grounding System, Diktat Kuliah AMG/03042014)

2.11 Pengujian Tanah

Pengujian tanah dilaksanakan dengan metode megger tanah, yang berdasarkan harga potensial. Jika ditinjau elektroda tanah dari pipa E yang

ditanam dan diandaikan ada potensial antara pipa E dan batang pasak R yang ditanam pada jarak yang cukup jauh, seperti terlihat pada gambar 2.7 arus yang mengalir diukur dengan meter A, apabila batang pasak yang lain, yaitu P sekarang ditanam di beberapa tempat di sekitar E, Voltmeter akan menunjukkan pada potensial antara pipa E dengan pasak P di beberapa tempat tersebut. Menurut hukum ohm, beda potensial ini berbanding langsung dengan tahanan tanah. Dari sini dapat di plot hubungan antara tahanan dengan jarak dari pipa E Seperti terlihat pada gambar 2.8

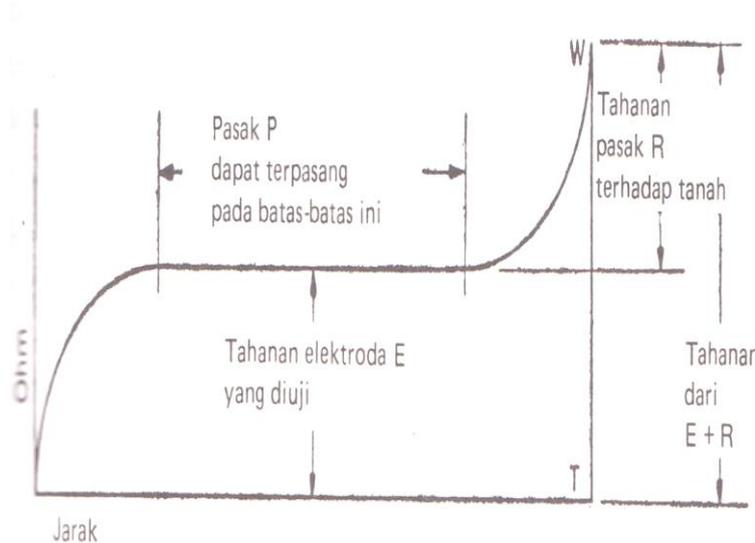


Gambar 2.8 Metode harga potensial tanah (Pabla A.S ‘Sistem distribusi daya listrik‘ 1991: 173)

Terlihat bahwa tahanan membesar dengan kedudukan P semakin jauh dari pipa e, dan bahwa kenaikan tersebut dengan cepat berkurang dan bahkan pada jarak tertentu dari pipa E, kenaikan dapat diabaikan karena sangat kecil. Pada kenyataannya, tahanan pada jarak ini berkisar 99% dari tahanan keseluruhan pada jarak tidak terbatas. Dengan cara yang sama, kurva dapat juga diplot dari arah yang lain, sehingga diperoleh titik – titik dalam satu daerah yang disebut daerah tahanan. Persyaratan yang harus diperhatikan adalah :

1. Elektroda R harus cukup jauh dari elektroda E, sehingga daerah tahanan tidak saling menutupi (overlap)
2. Elektroda P harus ditempatkan di luar dua daerah tahanan, dalam hal ini ditempatkan pada daerah datar dari kurva.

3. Elektroda P harus terletak di antara elektroda – elektroda R dan E, pada garis penghubungnya



Gambar 2.9 Pengaruh daerah tahanan pasak R yang jauh terhadap kurva harga potensial (Pabla A.S ‘Sistem distribusi daya listrik‘ 1991: 173)

2.12 Hal-Hal Yang Mempengaruhi Suatu Tahanan Tanah

Menurut NEC (1987, 250-83-3) mensyaratkan bahwa panjang elektroda pentanahan minimum 2,5 meter (8 kaki) dihubungkan dengan tanah. Ada empat variabel yang mempengaruhi tahanan sistem pentanahan, yaitu :

1. Panjang/kedalaman elektroda pentanahan

Satu cara yang sangat efektif untuk menurunkan tahanan tanah adalah memperdalam elektroda pentanahan. Tanah tidak tetap tahanannya dan tidak dapat diprediksi. Ketika memasang elektroda pentanahan, elektroda berada di bawah garis beku (frosting line). Hal ini dilakukan agar tahanan tanah tidak akan dipengaruhi oleh pembekuan tanah di sekitarnya. Secara umum, menggandakan panjang elektroda pentanahan bisa mengurangi tingkat tahanan sebesar 40%. Ada kejadian-kejadian dimana secara fisik tidak mungkin dilakukan pendalaman batang pentanahan di daerah-daerah yang terdiri dari batu, granit, dan

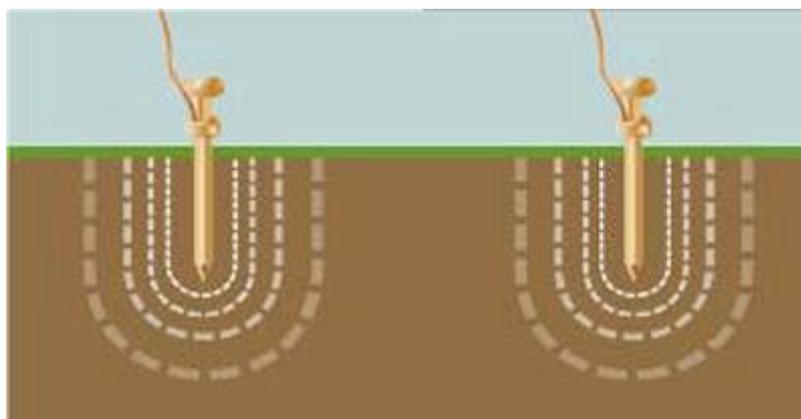
sebagainya. Dalam keadaan yang demikian, metode alternatif bisa menggunakan semen pentanahan (grounding cement).

2. Diameter elektroda pentanahan

Menambah diameter elektroda pentanahan berpengaruh sangat kecil dalam menurunkan tahanan. Misalnya, bila diameter elektroda digandakan maka tahanan pentanahan hanya menurun sebesar 10%

3. Jumlah Elektroda Pentanahan

Cara lain menurunkan tahanan tanah adalah menggunakan banyak elektroda pentanahan. Dalam desain ini, lebih dari satu elektroda dimasukkan ke tanah dan dihubungkan secara paralel untuk mendapatkan tahanan yang lebih rendah. Agar penambahan elektroda efektif, jarak batang tambahan setidaknya harus sama dalamnya dengan batang yang ditanam. Tanpa pengaturan jarak elektroda pentanahan yang tepat, bidang pengaruhnya akan berpotongan dan tahanan tidak akan menurun. Untuk membantu dalam memasang batang pentanahan yang akan memenuhi kebutuhan tahanan tertentu, maka dapat menggunakan tabel tahanan pentanahan di bawah ini. Ingatlah, ini hanya digunakan sebagai pedoman, karena tanah memiliki lapisan dan jarang yang sama (homogen), jadi nilai tahanannya akan sangat berbeda-beda.



Gambar 2.10. Elektrode pentanahan yang mempunyai pengaruh lapisan

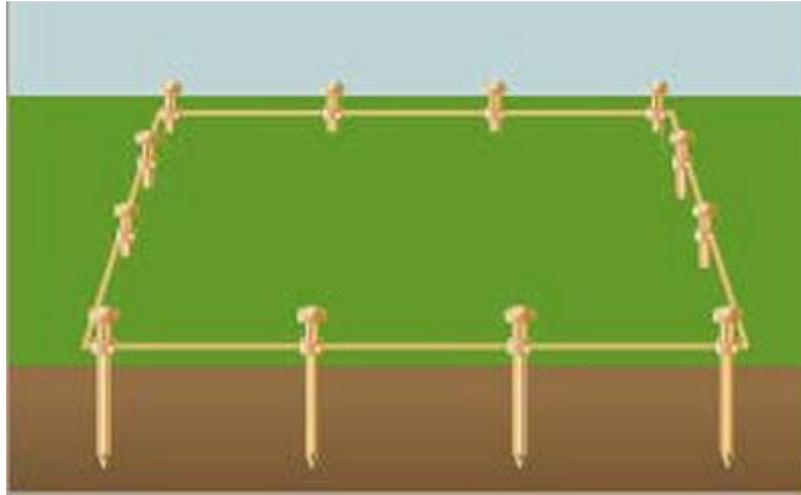
4. Desain Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan sederhana terdiri dari satu elektroda pentanahan yang dimasukkan ke tanah. Penggunaan satu buah elektroda pentanahan adalah hal yang umum dilakukan dalam pentanahan dan biasa ditemukan di luar rumah atau di toko-toko perorangan (lihat gambar 4).

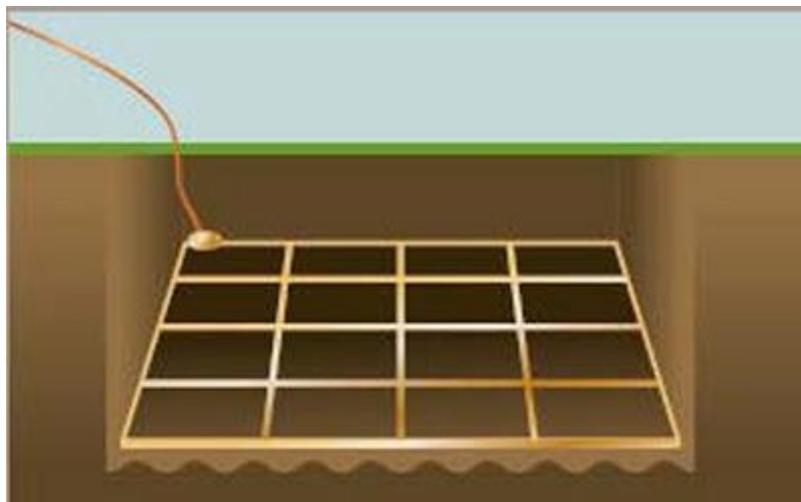


Gambar 2.11 Satu buah elektrode pentanahan

Ada pula sistem pentanahan kompleks terdiri dari banyak batang pentanahan yang terhubung, jaringan bertautan atau kisi-kisi, plat tanah, dan loop tanah (lihat gambar 5, 6 dan 7). Sistem-sistem ini dipasang secara khusus di substasiun pembangkit listrik, gedung perkantoran, dan tempat-tempat menara seluler. Jaringan kompleks meningkatkan secara dramatis jumlah kontak dengan tanah sekitarnya dan menurunkan tahanan tanah.



Gambar 2.12 Hubungan beberapa elektrode pentanahan



Gambar 2.13 Jaringan bertautan

2.13 Cara Menguji Sistem Pentanahan

Dalam waktu yang lama, tanah yang korosif dengan kelembaban tinggi, mengandung garam, dan suhu tinggi akan menurunkan kualitas batang pentanahan dan sambungan-sambungannya. Walaupun sistem pentanahan saat awalnya dipasang mempunyai nilai tahanan pentanahan ke tanah rendah, tahanan sistem pentanahan akan meningkat jika batang pentanahan rapuh. Alat ukur pentanahan (earth tester) baik yang analog maupun digital, adalah alat pencari kesalahan yang tidak diragukan guna membantu pemeliharaan.



Masalah-masalah listrik yang sering mati berkaitan dengan pentanahan yang kurang baik atau kualitas daya yang rendah. Itulah sebabnya sangat dianjurkan semua pentanahan dan sambungan pentanahan harus diperiksa minimal satu tahun sekali sebagai bagian dari program pemeliharaan. Selama periode pemeriksaan, jika terjadi peningkatan nilai tahanan pentanahan lebih dari 20 %, harus dilakukan pencarian sumber permasalahan dan dilakukan koreksi agar nilai tahanannya lebih rendah, dengan mengganti atau menambah batang pentanahan ke dalam sistem pentanahan.

Tahanan pentanahan merupakan hal yang tidak boleh diabaikan dalam pemasangan jaringan instalasi listrik . Pentanahan yang kurang baik tidak hanya membuang-buang waktu saja, tetapi pentanahan yang kurang baik juga berbahaya dan meningkatkan resiko kerusakan peralatan. Tanpa sistem pentanahan yang efektif, maka akan dihadapkan pada resiko sengatan listrik, disamping itu juga mengakibatkan kesalahan instrumen, distorsi harmonik, masalah faktor daya dan delima kemungkinan adanya intermitten. Jika arus gangguan tidak mempunyai jalur ke tanah melalui sistem pentanahan yang di desain dan dipelihara dengan baik, arus gangguan akan mencari jalur yang tidak diinginkan termasuk manusia.

Sebaliknya, pentanahan yang baik tidak hanya sekedar untuk keselamatan; tetapi juga digunakan untuk mencegah kerusakan peralatan industri. Sistem pentanahan yang baik akan meningkatkan reliabilitas peralatan dan mengurangi kemungkinan kerusakan akibat petir dan arus gangguan. Milyaran uang telah hilang tiap tahunnya di tempat kerja karena kebakaran akibat listrik. Kerugian-kerugian di atas tidak termasuk biaya pengadilan dan hilangnya produktivitas individu dan perusahaan.

Organisasi pemberi rekomendasi standar untuk kemananan pentanahan antara lain adalah :

1. OSHA (Occupational Safety Health Administration)
2. NFPA (National Fire Protection Association)
3. ANSI/ISA (American National Standards Institute and Instrument Society of America)
4. TIA (Telecommunications I ndustry Association)



5. IEC (International Electrotechnical Commission)
6. CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization)
7. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).