

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Pentanahan

Proses pentanahan dilakukan dengan menghubungkan semua bagian bendabenda yang mungkin menjadi sumber muatan yang akan mengalir ke tanah. Proses pentanahan dapat juga dikatakan membuat jalur bagi arus gangguan ke tanah atau membuat benda berada dalam potensial yang mendekati nilai potensial tanah (nol). Dalam teori yang sederhana hal ini akan mencegah adanya beda potensial antara tanah dengan benda yang ditanahkan sekaligus juga memungkinkan adanya aliran arus gangguan yang akan menyebabkan sistem pengamanan bekerja. Metode standar untuk menguji adanya catu daya dari sebuah benda ke tanah adalah dengan menghubungkan keduanya. Tahanan pentanahan adalah tahanan antara elektroda sistem pentanahan dengan elektroda lain pada jarak tertentu. Pentanahan ada dua peruntukan yaitu pentanahan sistem dan pentanahan peralatan. Sehingga pentanahan dapat didefinisikan, pentanahan merupakan penghubung bagian-bagian peralatan listrik yang pada keadaan normal tidak dialiri arus atau penghubung titik netral suatu sistem tenaga listrik atau badan dari peralatan listrik dengan tanah. Kontak dengan tanah ini dilakukan dengan menanam elektroda ke dalam tanah yang disebut dengan elektroda. (Hutauruk,1987.,Tajuddin, 1998).

2.2 Tujuan Pemasangan Sistem Pentanahan

Tujuan dari pemasangan sistem pentanahan adalah
(Hutauruk,1987.,Tajuddin, 1998) :

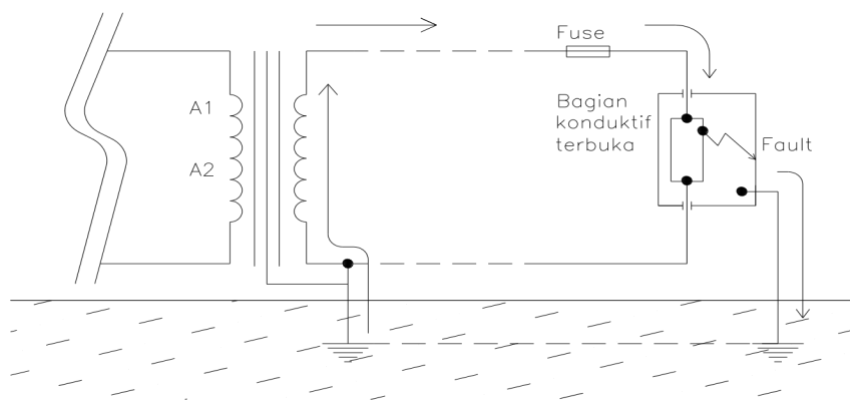
1. Untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang tidak dialiri arus dengan tanah sampai pada suatu harga yang aman untuk semua kondisi operasi, baik kondisi normal maupun saat terjadi gangguan.

5 Untuk memperoleh potensial yang merata dalam suatu bagian struktur dan peralatan serta untuk memperoleh impedansi yang rendah sebagai jalan balik arus hubung singkat ke tanah. Bila arus hubung singkat ke tanah dipaksakan mengalir melalui tanah dengan tahanan yang tinggi akan menimbulkan perbedaan tegangan yang besar dan berbahaya.

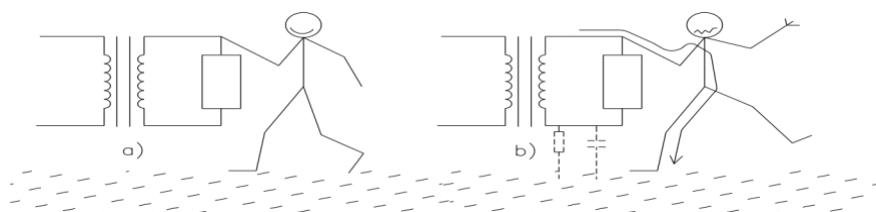
2.3 Keuntungan Pentanahan

Keuntungan penerapan pentanahan ada dua hal :

1. Semua sistem kelistrikan berada dalam potensial yang seragam dan tidak dimungkinkan adanya tegangan yang mengambang.
2. Dengan menghubungkan benda kerja yang terbuat dari logam ke tanah dengan menggunakan konduktor pengaman, jalur untuk arus gangguan ke tanah telah tersedia. Hal ini terlihat dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Jalur Untuk Arus Gangguan



Gambar 2.2. Bahaya Pada Sistem Tanpa Pentanahan.

- (a) Keamanan semu: tidak ada jalur yang jelas untuk arus kejut.
- (b) bahaya yang sebenarnya: arus kejut karena adanya resistansi dan kapasitansi tanah.

2.4 Gradien tegangan pada permukaan tanah

Menurut Tadjuddin, dkk (2000), Sudiarto (2000), Muliarto (2000) gradien tegangan antara titik sentuh pada peralatan dengan titik pada permukaan tanah tempat berdiri, atau gradien tegangan pada permukaan tanah yang bersentuhan dengan kedua kaki, dianggap menimbulkan bahaya bagi seseorang. Secara umum gradien tegangan yang timbul pada permukaan tanah selama mengalir arus gangguan tanah meliputi :

1. Tegangan sentuh

Tegangan sentuh adalah beda potential antara kenaikan potential tanah dengan potential pada suatu titik berjarak 1 meter pada permukaan tanah. Pada permukaan tanah ini seseorang berdiri sambil menyentuh suatu peralatan yang diketanahkan pada saat terjadi gangguan. Besarnya arus gangguan dibatasi oleh tahanan tubuh orang dan tahanan kontak ketanah dari kaki orang tersebut.

2. Tegangan langkah

Tegangan langkah adalah beda potential pada permukaan tanah dari dua titik yang berjarak satu langkah (1 meter) yang dialami seseorang yang menghubungkan kedua titik tersebut dengan kedua kakinya tanpa menyentuh suatu peralatan apapun.

3. Tegangan pindah (*transferred voltage*)

Tegangan pindah (tegangan peralihan) merupakan hal khusus dari tegangan sentuh, yang terjadi bila pada saat terjadi gangguan seseorang berada dalam suatu *switch yard* dan menyentuh suatu peralatan yang ditanahkan pada tempat/titik yang jauh, dan alat tersebut dialiri arus gangguan ke tanah. Tegangan pindah ini akan sama dengan tegangan pada tahanan kontak pengetanahan total. Untuk waktu tertentu dari arus gangguan, tegangan pindah yang diizinkan adalah sama dengan tegangan sentuh.

4. Tegangan sentuh

Tegangan sentuh adalah beda potensial antara kenaikan potensial tanah dengan potensial pada suatu titik berjarak 1 meter pada permukaan tanah. Pada permukaan tanah ini seseorang berdiri sambil menyentuh suatu peralatan yang diketanahkan pada saat terjadi gangguan. Besarnya arus gangguan dibatasi oleh tahanan tubuh orang dan tahanan kontak ketanah dari kaki orang tersebut.

5. Tegangan langkah

Tegangan langkah adalah beda potensial pada permukaan tanah dari dua titik yang berjarak satu langkah (1 meter) yang dialami seseorang yang menghubungkan kedua titik tersebut dengan kedua kakinya tanpa menyentuh suatu peralatan apapun.

6. Tegangan pindah (*transferred voltage*)

Tegangan pindah (tegangan peralihan) merupakan hal khusus dari tegangan sentuh, yang terjadi bila pada saat terjadi gangguan seseorang berada dalam suatu *switch yard* dan menyentuh suatu peralatan yang ditanahkan pada tempat/titik yang jauh, dan alat tersebut dialiri arus gangguan ke tanah. Tegangan pindah ini akan sama dengan tegangan pada tahanan kontak pengetanahan total. Untuk waktu tertentu dari arus gangguan, tegangan pindah yang diizinkan adalah sama dengan tegangan sentuh.

2.5 Pengertian Pentanahan Peralatan

Pentanahan peralatan merupakan penghubungan bagian bagian peralatan listrik yang pada keadaan normal tidak dialiri arus. Kontak dengan tanah ini dilakukan dengan menanamkan konduktor kedalam tanah. Konduktor yang ditanam didalam tanah disebut elektroda pentanahan(Tampubolon, 1989).

Sedangkan batang pentanahan adalah sebuah konduktor yang ditanam didalam tanah dan dipergunakan untuk mengalirkan dan melepaskan arus pentanahan ke dalam bumi (IEEE, 1990). Agar sistem pentanahan dapat bekerja secara efektif, harus memenuhi persyaratan – persyaratan sebagai berikut :

- a. Membuat jalur impedansi rendah ke tanah untuk mengamankan personil dan peralatan, menggunakan rangkaian yang efektif.

- b. Dapat mengatasi gangguan arus akibat surja hubung (*surge currents*).
- c. Menggunakan bahan tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah, untuk meyakinkan kontinuitas penampilannya sepanjang umur peralatan yang dilindungi

2.6 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. Pada suatu lokasi tertentu sering dijumpai beberapa jenis tanah yang mempunyai tahanan jenis yang berbedabeda (*non uniform*).

Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi tahanan jenis tanah antara lain: Pengaruh temperatur, pengaruh gradien tegangan, pengaruh besarnya arus, pengaruh kandungan air dan pengaruh kandungan bahan kimia. Pada sistem pengetanahan yang tidak mungkin atau tidak perlu untuk ditanam lebih dalam sehingga mencapai air tanah yang konstan, variasi tahanan jenis tanah sangat besar. Kadangkala pada penanaman elektroda memungkinkan kelembaban dan temperatur bervariasi, untuk hal seperti ini harga tahanan jenis tanah harus diambil dari keadaan yang paling buruk, yaitu tanah kering dan dingin. Berdasarkan harga inilah dibuat suatu perencanaan pengetanahan. Perbedaan tahanan jenis tanah akibat iklim biasanya terbatas sampai kedalaman beberapa meter dari permukaan tanah, selanjutnya pada bagian yang lebih dalam secara praktis akan konstan.

Nilai tahanan jenis tanah (ρ) sangat tergantung pada tahanan tanah (R) dan jarak antara elektroda-elektroda yang digunakan pada waktu pengukuran. Pengukuran perlu dilakukan pada beberapa tempat yang berbeda guna memperoleh nilai rata-ratanya.

Perbedaan tahanan jenis tanah akibat iklim biasanya terbatas sampai kedalaman beberapa meter dari permukaan tanah, selanjutnya pada bagian yang lebih dalam secara praktis akan konstan.

2.7. Konduktor Pentanahan

Konduktor yang digunakan untuk pentanahan harus memenuhi beberapa persyaratan antara lain:

- Memiliki daya hantar jenis (conductivity) yang cukup besar sehingga tidak akan memperbesar beda potensial lokal yang berbahaya.
- Memiliki kekerasan (kekuatan) secara mekanis pada tingkat yang tinggi terutama bila digunakan pada daerah yang tidak terlindung terhadap kerusakan fisik.
- Tahan terhadap peledakan dari keburukan sambungan listrik, walaupun konduktor tersebut akan terkena magnitude arus gangguan dalam waktu yang lama.
- Tahan terhadap korosi.

2.8. Tegangan pada permukaan Gradien tanah

Gradien tegangan antara titik sentuh pada peralatan dengan titik pada permukaan tanah tempat berdiri, atau gradien tegangan pada permukaan tanah yang bersentuhan dengan kedua kaki, dianggap menimbulkan bahaya bagi seseorang. Secara umum gradien tegangan yang timbul pada permukaan tanah selama mengalir arus gangguan tanah meliputi (Tadjuddin, dkk 2000),:

2.9. Jenis-jenis Elektroda Sistem Pentanahan

Jenis elektroda pentanahan yang biasa digunakan untuk pengamanan sistem maupun pengamanan peralatan yaitu (Hermawan, 1985) :

a. Elektroda Pita

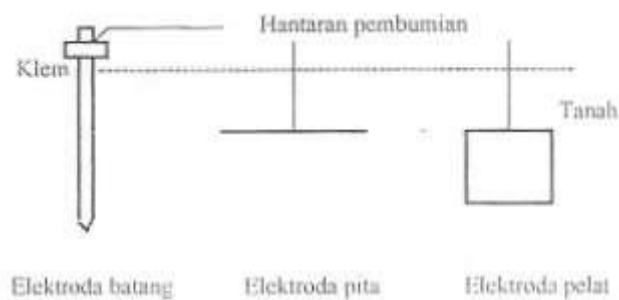
Elektroda pita adalah elektroda yang terbuat dari hantaran berbentuk pita atau berpenampang bulat atau hantaran pilin yang pada umumnya ditanam secara dangkal. Kedalaman pemasangan minimal 0,5 m.

b. Elektroda Batang

Elektroda Batang atau pasak adalah elektroda dari pipa atau besi baja yang dilapisi tembaga yang ditancapkan kedalam tanah secara tegak lurus atau mendatar.

c. Elektroda Pelat

Elektroda Pelat adalah elektroda dari bahan pelat logam atau pelat logam berlubang atau dari kawat kasa yang dipasang tegak lurus didalam tanah dengan tepi atasnya sekurang-kurangnya 1 m dibawah permukaan tanah.

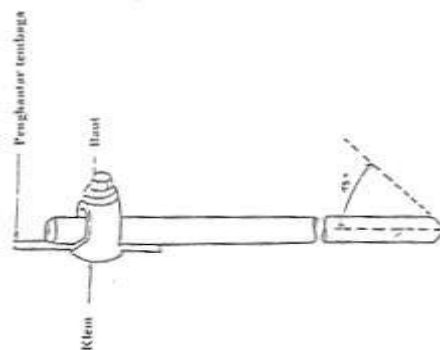


Gambar 2.3 Jenis Elektroda Pentanahan

d. Elektroda Pentanahan Jenis Batang Bulat Berlapis Tembaga

Elektroda pentanahan adalah penghantar yang terbuat dari batang logam bulat yang dilapisi tembaga yang ditanam/ dipancangkan kedalam tanah dan membuat kontak langsung dengan tanah.

Elektroda pentanahan harus terbuat dari batang baja pejal yang berlapis tembaga dan salah satu ujungnya lancip dengan sudut kelancipan $(45 \pm 5)^\circ$, seperti terlihat pada Gambar 2.4 (Nugraha, 1999; SPLN 102).



Gambar 2.4 Elektroda Pentanahan

2.10 Pengujian Elektroda

Pengujian sebuah elektroda sangat penting dilakukan agar terjaminnya sebuah sistem pentanahan. Elektroda pentanahan sebelum dipasarkan harus melalui beberapa pengujian seperti :

1. Uji jenis : pengujian untuk mengetahui sifat-sifat menyeluruh (lengkap) dari elektroda pentanahan. Pengujian ini pada umumnya hanya dilakukan sekali untuk setiap jenis dari setiap pabrik pembuat.
2. Uji contoh : pengujian untuk mengetahui sifat-sifat tertentu dari sejumlah elektroda pentanahan yang akan diserahkan terimakan. Pengujian ini dilaksanakan pada beberapa elektroda pentanahan yang diambil menurut cara tertentu sedemikian rupa sehingga mewakili sejumlah elektroda pentanahan.
3. Uji rutin : pengujian untuk memisahkan elektroda pentanahan yang cacat atau menyimpang dari persyaratan dalam standar yang telah ditentukan. Pengujian ini dilaksanakan pada setiap elektroda pentanahan yang diproduksi.

2.10.1 Syarat bahan dan mutu elektroda pentanahan

Bahan-bahan yang digunakan pada sistem pentanahan harus memenuhi persyaratan sehingga mutu dari material sistem pentanahan dapat sesuai standar yang berlaku. Syarat-syarat tersebut antara lain (Pabla, 1986) :

a. Syarat bahan :

Batang elektroda pentanahan harus terbuat dari baja karbon tinggi dengan kuat tarik minimum 51 kg/mm², serta mempunyai kekerasan minimum 74 HrB (Hardness Brinell).

- Lapisan tembaga

Untuk lapisan tembaga harus mempunyai kadar tembaga minimum 99,9%.

- Klem dan baut

Klem dan baut harus terbuat dari tembaga paduan dengan kadar tembaga minimum 60%.

b. Syarat mutu :

Elektroda pentanahan harus mempunyai permukaan yang halus, rata, bersih dan tidak berpori. Kelancipan ujung batang elektroda pentanahan diperiksa dengan menggunakan busur berskala. Kelurusan elektroda diperiksa dengan menggunakan benang. Diameter diukur dengan menggunakan jangka sorong atau micrometer yang mempunyai resolusi pembacaan minimum 0,001 mm. Panjang batang diukur dengan meteran yang mempunyai resolusi pembacaan 1 mm. Tebal lapisan tembaga diukur dengan alat yang sesuai dengan resolusi pembacaan minimum 1 mikron. Untuk komposisi bahan diuji secara analisa kimia atau spektrofotometer secara atom. Kuat tarik diuji dengan menggunakan mesin kuat tarik. Kekerasan diukur dengan alat ukur kekerasan Brinell atau yang sejenis.

Sedangkan sifat mekanis diharuskan memiliki :

- Kemampuan penancangan

Ujung lancip elektroda ditancapkan kedalam tanah, lalu bagian ujung lainnya dipukul dengan menggunakan martil (palu tangan) atau palu luncur yang beratnya 2 – 4 kg. Pemukulan dilakukan sampai seluruh batang elektroda pentanahan masuk kedalam tanah. Selama penancangan elektroda tidak boleh pecah, bengkok atau patah.

- Kelekatan lapisan

Ujung lancip pada batang elektroda dimasukkan diantara dua rahang plat baja kemudian didorong hingga 50 cm. Jarak rahang plat baja adalah diameter elektroda dikurangi 1,02 mm. Lapisan tembaga yang terdapat pada elektroda tidak boleh terkelupas kecuali pada bagian yang terkena rahang plat baja.

- Kemampuan tekuk

Batang elektroda pentanahan dijepit kemudian ditekuk dengan gaya pada jarak 40 x diameter batang elektroda dari titik jepit sehingga membentuk sudut tetap sebesar 30° terhadap sumbu batang elektroda, lapisan tembaga pada elektroda tidak boleh rusak.

- Korosi

Batas maksimum laju korosi yang diijinkan pada batang elektroda pentanahan adalah sebesar 50 mg/dm²/hari.

- Sifat listrik

- Resistan kontak sebelum arus uji waktu singkat.

Pengukuran resistan kontak antara penghantar dan batang elektroda dilakukan dengan mengalirkan arus searah 100 A selama 1 menit.

Pengukuran dilakukan dengan mengukur turun tegangan (ΔV) dan pengukuran dilakukan pada suhu ruang (27 ± 2)°C. Sebelum dilakukan pengujian dengan arus uji waktu singkat, nilai resistan kontak antara penghantar dan batang elektroda maksimum 15 mikro ohm.

- Resistan kontak sesudah arus uji waktu singkat.

Sesudah dilakukan pengujian dengan arus uji waktu singkat, nilai resistan kontak antara penghantar dan batang elektroda maksimum 20 mikro ohm.

- Resistan batang elektroda pentanahan.

Pengukuran resistan elektroda pentanahan dilakukan dengan menggunakan alat ukur Double Bridge. Nilai resistan batang elektroda pentanahan setelah pengukuran maksimum 5×10^{-3} ohm/meter pada suhu 27° C.

2.11 Sifat-Sifat Dari Sebuah Sistem Elektroda Tanah

Hambatan arus yang melewati sistem elektroda tanah mempunyai tiga komponen yaitu (Pabla, 1986) :

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

Pasak-pasak tanah, batang-batang logam, struktur dan peralatan lain biasa digunakan untuk elektroda tanah. Elektroda-elektroda ini umumnya besar dan penampangnya sedemikian sehingga

tahanannya dapat diabaikan terhadap tahanan keseluruhan sistem pentanahan. Tahanan antara elektroda dan tanah jauh lebih kecil dari yang biasanya diduga. Apabila elektroda bersih dari minyak atau cat dan tanah dapat dipasak dengan kuat, maka Biro Standarisasi Nasional Amerika Serikat menyatakan bahwa tahanan kontak dapat diabaikan (Pabla, 1986).

Pasak dengan tahanan seragam yang ditanam ke tanah akan menghantarkan arus ke semua jurusan. Ditinjau dari suatu pasak 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 tidak menambah besarnya tahanan tanah sekeliling pasak, jarak ini disebut daerah tahanan efektif (Pabla, 1986).

2.12 Diameter Konduktor Pentanahan

Diameter konduktor pentanahan sangat menentukan nilai tahanan pentanahan. Ukuran konduktor pentanahan yang digunakan berpengaruh terhadap nilai tahanan pentanahan. Sehingga untuk mendapatkan nilai tahanan pentanahan yang tepat atau mendapatkan nilai tahanan pentanahan yang diinginkan harus memperhatikan ukuran elektroda atau konduktor pentanahan disamping memperhatikan faktor-faktor yang lain seperti jenis tanah, kandungan elektrolit tanah dan lain-lain. Pemilihan ukuran diameter konduktor pentanahan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu (Nugraha, 1999) :

1. Tidak melebur atau rusak apabila dialiri arus kesalahan yang mungkin terjadi.
2. Tahan secara mekanis terhadap tekanan-tekanan yang mungkin timbul.
3. Mempunyai konduktivitas yang baik dan merata.

2.13 Susunan Elektroda Pentanahan

Dengan memperhatikan tekstur tanah atau jenis tanah, maka susunan elektroda pentanahan yang dipasang sangat penting memperhatikan teknik pemasangan elektroda pentanahan. Secara garis besar susunan elektroda pentanahan dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

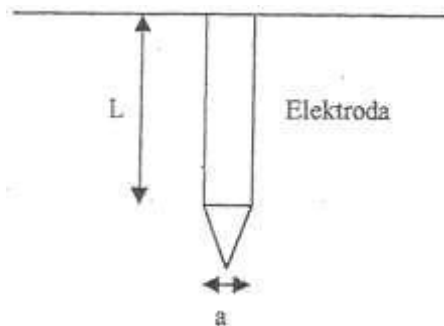
1. Pentanahan elektroda yang ditanam secara vertikal
2. Pentanahan elektroda yang ditanam secara horisontal.

Pemilihan bentuk pentanahan elektroda ini dipengaruhi oleh jenis tanah dan tempat dimana sistem pentanahan itu dipasang. Untuk daerah-daerah yang tanahnya keras dan berbatu lebih praktis kalau menggunakan pentanahan secara horisontal karena tidak memerlukan penanaman yang dalam, tetapi memerlukan lebih banyak batang pentanahan sehingga biayanya akan lebih besar. Sedangkan untuk daerah yang struktur tanahnya tidak terlalu keras, pentanahan secara vertikal dapat dipakai. Karena memungkinkan untuk menanam elektroda lebih dalam kedalam tanah, sehingga tahanan pentanahan dapat dikurangi.

2.13.1 Pentanahan dengan elektroda ditanam vertikal (pentanahan rod)

Pentanahan dengan elektroda secara vertikal/ rod adalah pentanahan dengan cara menanam batang-batang elektroda kedalam tanah secara tegak lurus. Untuk memperkecil tahanan pentanahan maka jumlah batang-batang elektroda yang ditanam diperbanyak dan antara ujung-ujung elektroda dihubungkan dengan ground bus. Pentanahan dengan elektroda yang ditanam vertikal (rod) sesuai untuk daerah yang mempunyai struktur tanah tidak terlalu keras, karena jika tanahnya terlalu keras dan berbatu, maka pemasangannya menjadi sulit.

Untuk satu batang elektroda yang ditanam tegak lurus permukaan tanah dan ujung atasnya tepat pada permukaan tanah seperti Gambar 2.5, dimana tahanan pentanahannya menurut Dwight didapat dengan persamaan (2.1) (Hutauruk, 1987; Hermawan, 1985).



Gambar 2.5 Pentanahan Satu Batang Elektroda Ditanam Vertikal

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (\Omega) \dots\dots\dots (2.1)$$

Untuk n batang pentanahan berlaku persamaan berikut :

$$R_n = \frac{\eta R}{n} \quad (\Omega)$$

Maka dapat diketahui bahwa:

R =Tahanan dari satu batang elektroda (Ω)

L =Panjang batang elektroda kedalam tanah (cm)

P =Tahanan jenis tanah (Ω -cm)

α = Jari-jari batang elektroda (cm)

η = koefisien kombinasi

n = banyaknya elektrpda pentanahan

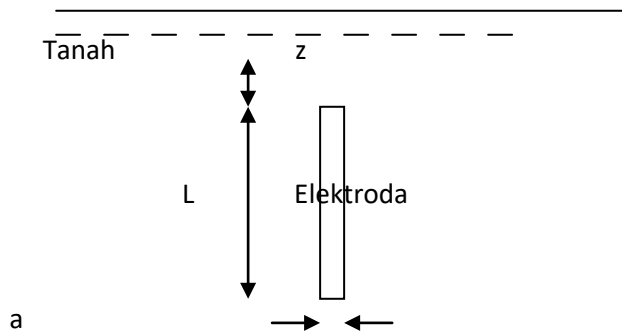
η tergantung dari jarak antara dari masing-masing yang harganya diperlihatkan dalam Tabel 2.1 (Arismunandar, 1991).

Tabel 2.1 Nilai Koefisien Kombinasi

Jarak antara (meter)	0,5	1	2	3	4	5
Koefisien Kombinasi	1,35	1,20	1,15	1,10	1,05	1,0

(Arismunandar, 1991).

Persamaan (2.2) yang telah umum yang bisa dipergunakan untuk menghitung tahanan pentanahan elektroda yang ujung atasnya tidak tepat diatas permukaan tanah seperti Gambar 2.6 (Pabla, 1986., Hutaaruk, 1987).



Gambar 2.6 Satu Batang Elektroda yang Ditanam dengan Kedalaman Z dari Ujung Atasnya

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{a} - 1 + \ln \frac{1 + z/L}{1 + 2z/L} + \frac{z}{L} \ln \frac{4z/L + 4(z/L)^2}{1 + 4z/L + 4(z/L)^2} \right] \dots\dots\dots(2.2)$$

Persamaan yang digunakan menghitung tahanan pentanahannya adalah :

Keterangan :

R = tahanan pentanahan (Ω)

L = panjang elektroda pentanahan

ζ = jarak ujung atas batangelektroda dengan permukaan tanah (m)

ρ tahanan jenis tanah (Ω -m)

α =jari-jari elektroda pentanahan (m)

Keuntungan sistem pentanahan satu batang elektroda yang ditanam vertikal (rod)

- Bentuknya sederhana.
- Biaya investasinya lebih murah.
- Pemasangan lebih mudah dan cepat.
- Tidak memerlukan daerah pentanahan yang luas.

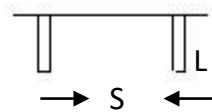
Kerugian sistem pentanahan satu batang elektroda yang ditanam vertikal adalah :

- Sulit diterapkan pada daerah dengan struktur tanah yang keras dan berbatu.
- Kurang efektif digunakan pada daya yang besar.
- Apabila terjadi kerusakan pada saluran, maka sistem pentanahan benar-benar terputus, sehingga perlu dilakukan pemasangan ulang.

2.13.2 Dua Batang Elektroda Tegak Lurus ke Dalam Tanah

Susunan dari dua batang elektroda berbentuk selinder dengan panjang L yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah dengan jarak antara ke dua elektroda tersebut sebesar S terlihat pada gambar di bawah. Nilai tahanan pentanahan dan tahanan jenis tanah yang relatif tinggi, maka

untuk menguranginya dengan cara menanamkan batang-batang elektroda pentanahan dalam jumlah yang cukup banyak. Untuk dua batang elektroda pentanahan yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah oleh *Dwight, J.L. Marshall* dengan memperhatikan efek bayangan biasanya adalah dengan menghitung tegangan pada salah satu batang elektroda yang disebabkan oleh distribusi muatan yang merata di batang elektroda itu sendiri dan pada batang elektroda yang lain termasuk bayangannya. Dengan menghitung tegangan rata-rata yang disebabkan oleh muatan batang elektroda itu sendiri dan menghitung tegangan rata-rata yang disebabkan oleh muatan batang elektroda yang lain. Tegangan total rata-rata diperoleh dengan menjumlahkan antara keduanya (Hutauruk, 1987).



Gambar 2.7 Dua batang elektroda ditanam tegak lurus ke dalam tanah

Rumus tahanan pentanahan untuk dua batang elektroda yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah adalah :

$$R_{d2} = \frac{\rho}{4\pi L} \left(L \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{L^2}{3S^2} + \frac{2L^4}{5S^4} \dots \right) \dots \dots \dots (2.3)$$

untuk $S > L$

$$R_{d2} = \frac{\rho}{4\pi L} \left(L \ln \frac{4L}{a} + L \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} + \dots \right) \dots \dots \dots (2.4)$$

untuk $S < L$ dimana : S : jarak antara kedua elektroda (meter)

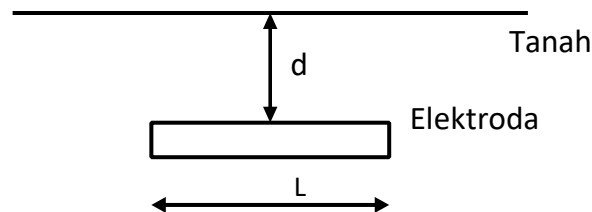
2.13.3 Pentanahan dengan elektroda ditanam horisontal

Pentanahan elektroda horisontal adalah pentanahan dengan cara menanamkan elektroda pentanahan sejajar permukaan tanah dengan kedalaman tertentu (30-90 cm). Pentanahan seperti ini dilakukan pada daerah yang berbatu karena tidak memerlukan penggalian yang terlalu dalam.

Yang termasuk didalam pentanahan elektroda secara horisontal adalah pentanahan bentuk cincin dan pentanahan bentuk bintang (Nugraha, 1999)

2.13.4 Pentanahan dengan Satu Elektroda Horisontal

Cara pentanahan seperti ini adalah pentanahan sederhana, yakni hanya satu batang elektroda yang ditanam sejajar permukaan tanah seperti Gambar 2.8 (Hermawan,1985).



Gambar 2.8 Satu batang elektroda yang ditanam horisontal permukaan tanah

Persamaan tahanan pentanahan untuk satu batang elektroda yang ditanam horisontal (sejajar) permukaan tanah.adalah :

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{d} - 2 + \frac{d}{2L} - \frac{d^2}{16L^2} + \frac{d^4}{512L^4} - \dots \right) \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

R = tahanan pentanahan (Ω)

ρ = tahanan jenis tanah (Ω -m)

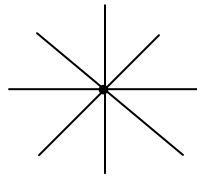
L = panjang elektroda pentanahan (m)

a = diameter konduktor pentanahan (m)

d = jarak elektroda dari permukaan tanah (m)

2.13.5 Pentanahan bentuk radial

Pentanahan bentuk radial merupakan susunan pentanahan yang ditanam sejajar permukaan tanah dan berpotongan secara radial seperti Gambar 2.9, bentuk ini sering dipakai pada pentanahan menara transmisi (Hermawan, 1985).



Gambar 2.9 Pentanahan Bentuk Radial

Besarnya tahanan pentanahan bentuk radial dapat dicari dengan persamaan (2.4) berikut :

$$R = \frac{\rho}{\pi n L} \left(\ln \frac{2L}{a} - 1 + N(n) \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan :

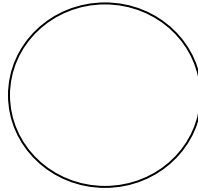
$$N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \frac{1 + \sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan :

- R = tahanan pentanahan (Ω)
- ρ = tahanan jenis tanah (Ω -m)
- a = jari-jari diameter (m)
- n=banyaknyalengan elektroda
- m = 1,2,3,...n-1
- L = panjang elektroda (meter)

2.13.6 Pentanahan bentuk cincin

Pentanahan bentuk cincin adalah pentanahan dengan menanamkan elektroda pentanahan berbentuk cincin (lingkaran) sejajar permukaan tanah, seperti Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Pentanahan Bentuk Cincin

Tahanan pentanahannya dapat dihitung dengan persamaan (2.6) yang diturunkan oleh H.B.Dwight, (Hutauruk, 1987)

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln 1,27 \frac{L}{\sqrt{2ad}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

R = tahanan pentanahan(Ω)

ρ = tahanan jenis tanah (Ω-m)

a = jari-jari cincin (m)

d = kedalaman pentanahan (m)

2.13.7 Pentanahan bentuk grid.

Pada kenyataannya pentanahan rod yang dilakukan dengan menanam beberapa elektroda tegak lurus dengan permukaan tanah, akan memerlukan batang elektroda untuk menghubungkan dengan ground bus. Bila konduktor penghubung tersebut ditanam dibawah permukaan tanah, maka susunan konduktor penghubung tersebut akan berbentuk grid sehingga akan didapatkan metode pentanahan gabungan dari rod dan grid. Keuntungan pentanahan gabungan ini adalah akan didapatkannya tahanan pentanahan yang lebih kecil daripada kedua pentanahan tersebut, namun memerlukan biaya tambahan untuk penggabungan kedua jenis pentanahan tersebut. Perhitungan tahanan pentanahan dengan sistem grid.

$$R_g = \rho \left\{ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right] \right\} (\Omega) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana:

R_g = adalah tahanan pentanahan dengan sistem grid (ohm)

ρ = tahanan jenis tanah (ohm – meter)

L = adalah panjang keseluruhan rod (meter)

A =Luas Grid meter)

h = tinggi penanaman grid (meter)

2.13.8 Sistem pentanahan bentuk pelat

Pentanahan bentuk pelat merupakan elektroda pentanahan yang berbentuk lembaran pelat terbuat dari tembaga yang ditanam secara tegak lurus terhadap permukaan tanah. Jarak ujung pelat elektroda paling sedikit 60 cm dari permukaan tanah (Hutauruk, 1987).

$$R_g = \rho \left\{ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right] \right\} (\Omega) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana : $L = (s + a)$ panjang elektroda pentanahan (meter)

a = Panjang sisi pelat tegak lurus permukaan tanah (meter)

b = Panjang sisi pelat sejajar permukaan tanah (meter)

s = Jarak pelat dari permukaan tanah (meter)

ρ = Tahanan jenis tanah (ohm – meter)

R = Tahanan pentanahan (ohm)

2.14 Tahanan Tubuh Manusia

Tahanan tubuh manusia berkisar di antara 500 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. Berdasarkan hasil penyelidikan oleh para ahli maka sebagai pendekatan diambil harga tahanan tubuh manusia sebesar 1000 Ohm (Hutauruk, 1987).

2.14.1 Arus Melalui Tubuh Manusia

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 terasa 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 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. Adapun batas arus yang melewati tubuh manusia dan pengaruhnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini (Hutaeruk, 1987)

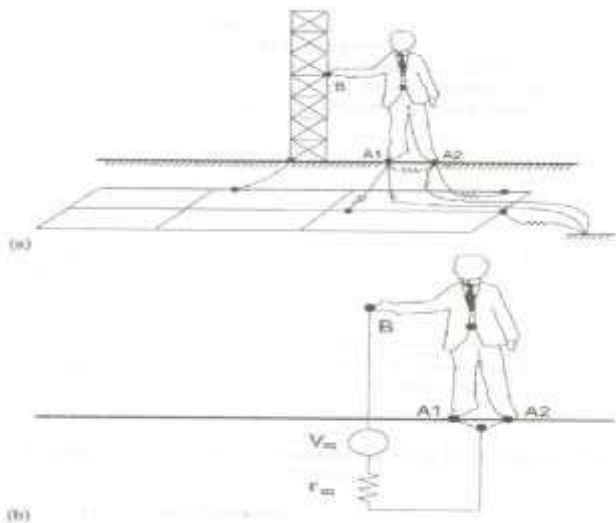
Tabel 2.2 Batas arus yang melewati tubuh manusia

Batas Arus (mA)	Pengaruh Pada Tubuh Manusia
0 – 0,9	Belum merasakan pengaruh
0,9 – 1,2	Baru terasa adanya arus listrik namun belum merasa kejang
1,2 – 1,6	Mulai merasa seakan-akan ada yang merayap di dalam tangan
1,6 – 6,0	Tangan sampai ke siku merasa kesemutan
6,0 – 13,0	Tangan mulai kaku, rasa kesemutan semakin bertambah
13,0 – 15,0	Rasa sakit tak tertahankan namun penghantar masih dapat dilepas
15,0 – 20,0	Otot tidak sanggup lagi melepaskan penghantar
20,0 – 50,0	Dapat mengakibatkan kerusakan pada tubuh manusia
50,0 – 100,0	Batas arus yang dapat menyebabkan kematian

Sumber: (PUIL, 2000)

2.14.2 Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah beda potensial antara kenaikan potensial tanah dengan potensial pada suatu titik berjarak 1 meter pada permukaan tanah. Pada permukaan tanah ini seseorang berdiri sambil menyentuh suatu peralatan yang ditanahkan pada saat terjadi gangguan. Besarnya arus gangguan dibatasi oleh tahanan tubuh orang dan tahanan kontak ke tanah dari kaki orang tersebut. Terjadinya tegangan sentuh pada seseorang yang memegang suatu peralatan yang ditanahkan pada Gardu Induk dapat diperlihatkan pada gambar dibawah (IEEE,1986).



Gambar 2.11 Tegangan sentuh yang terjadi pada saat seseorang menyentuh peralatan yang ditanahkan

Dengan :

A1 = Kontak kaki yang pertama dari seseorang pada areal pentanahan

A2 = Kontak kaki yang kedua dari seseorang pada areal pentanahan

B = Kontak tangan seseorang dengan peralatan yang ditanahkan

V_{eq} = Tegangan ekivalen yang timbul pada tubuh manusia

r_{eq} = Tahanan pengganti antara A1, A2 dengan ground

Penelitian yang telah dilakukan oleh Dalziel disebutkan bahwa 99.5 % dari semua orang yang beratnya kurang dari 50 kg masih dapat menahan arus pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz yang mengalir melalui tubuhnya dan waktu yang ditentukan (Hutaaruk, 1987).

2.15 Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah merupakan faktor keseimbangan antara tahanan dan kapasitansi disekelilingnya yang direpresentasikan dengan ρ . Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung dari beberapa faktor yaitu :

- Jenis tanah : tanah liat, berpasir, berbatu dan lain-lain.
- Lapisan tanah : berlapis-lapis dengan tahanan berbeda atau uniform.
- Kelembaban tanah.
- Suhu.

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, dapat dilakukan dengan menanam elektroda pentanahan sampai mencapai kedalaman tertentu dimana terdapat airtanah yang konstan. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata-rata untuk keperluan perencanaan diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu tertentu. Setelah diperoleh harga tahanan jenis tanah maka diambil harga yang paling tinggi pada suatu kondisi tanah.

Karena kadang kala penanaman memungkinkan kelembaban dan suhu bervariasi, harga tahanan jenis tanah harus diambil untuk keadaan yang paling buruk yaitu tanah kering dan dingin. Berikut ini tabel 2.2 memperlihatkan tahanan jenis tanah rata-rata untuk bermacam-macam jenis tanah (PUIL 2000).

Tabel 2.3 Tahanan Berbagai Jenis Tanah

Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah (ohm-meter)
Tanah rawa	30
Tanah liat dan tanah lading	100
Pasir basah	200
Kerikil basah	500

Pasir dan kerikil kering	1000
Tanah berbatu	3000

Sumber: (PUIL, 2000)

2.16 Klasifikasi Tanah

Suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda, tapi mempunyai sifat yang serupa kedalam kelompok-kelompok atau sub-sub kelompok tertentu disebut dengan klasifikasi tanah. Sistem klasifikasi dalam mekanika tanah bertujuan untuk memberikan keterangan mengenai sifat-sifat teknis dari bahan-bahan itu dengan cara yang sama seperti halnya pernyataan-pernyataan secara geologis dimaksudkan untuk memberikan keterangan mengenai asal geologis dari bahan-bahan tersebut (Hadjowigeno, 1993).

Tujuan klasifikasi tanah adalah :

1. Mengorganisasi (menata) pengetahuan kita tentang tanah.
2. Untuk mengetahui hubungan masing-masing individu tanah satu sama lain.
3. Memudahkan mengingat sifat-sifat tanah.
4. Mengelompokkan tanah untuk tujuan-tujuan yang lebih praktis seperti dalam hal :
 - Menaksir sifat-sifatnya.
 - Menentukan lahan-lahan terbaik.
 - Menaksir produktivitas.
 - Menentukan areal untuk penelitian, atau kemungkinan ekstrapolasi hasil penelitian disuatu tempat.
5. Mempelajari hubungan-hubungan dan sifat-sifat tanah yang baru.

Dari sudut pandang teknis, tanah-tanah dapat digolongkan kedalam macam pokok berikut ini (Hadjowigeno, 1993) :

1. Batu krikil (*gravel*).
2. Pasir (*Sand*).
3. Lanau (*Silt*).

4. Lempung (*Clay*).

2.16.1 Batu Kerikil dan Pasir

Golongan batu kerikil dan pasir ini terdiri atas pecahan-pecahan batu dengan berbagai ukuran dan bentuk. Butir-butir batu kerikil biasanya terdiri dari pecahan-pecahan batu, tetapi kadang-kadang terdiri dari satu macam zat mineral tertentu, seperti kwartz atau flint. Butir-butir pasir hampir selalu terdiri dari satu macam zat mineral terutama kwartz. Dalam beberapa hal mungkin hanya terdapat butiran-butiran dari satu ukuran saja (seragam). Pada macam ini terdapat ukuran-ukuran butir yang mencakup semua daerah ukuran dari ukuran batu besar sampai ke ukuran pasir halus yang dalam hal ini dikatakan bergradasi baik.

Sifat-sifat utama pasir adalah sebagai berikut :

1. Pasir sama sekali tidak melekat
2. Jenis tanah yang berbutir kasar
3. Mempunyai sifat gesekan
4. Mudah dilalui air
5. Bila murni butir-butir pasir lepas
6. Kembang susutnya kecil
7. Bersifat nonplastis

2.16.2 Tanah Lempung

Tanah lempung terdiri dari butiran yang sangat kecil dan menunjukkan sifat-sifat plastis dan kohesi. Kohesi menunjukkan kenyataan bahwa bagian-bagiannya melekat satu sama lain, sedangkan plastisitas adalah sifat yang memungkinkan bentuknya diubah-ubah tanpa perubahan isi atau tanpa kembali ke bentuk aslinya dan tanpa terjadi retakan-retakan atau terpecah-pecah. Sifat-sifat tanah lempung adalah sebagai berikut :

1. Mempunyai sifat melekat
2. Bersifat plastis
3. Mempunyai kembang susut
4. Impermiabel
5. Angka pori tinggi
6. Koefisien gesekan sangat kecil

2.16.3 Tanah lanau

Tanah lanau merupakan bahan peralihan antara lempung dan pasir halus. Tanah lanau kurang plastis dan lebih mudah ditembus air dari pada tanah lempung, dan menunjukkan sifat dilatasi yang tidak terdapat pada tanah lempung. Sifat-sifat tanah lanau adalah sebagai berikut :

1. Diameternya halus sehingga mudah hanyut
2. Jika basah berupa lumpur
3. Jika kering berupa debu.

2.17 Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah merupakan faktor keseimbangan antara tahanan dan

kapasitansi disekelilingnya yang direpresentasikan dengan ρ . Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung dari beberapa faktor yaitu :

- Jenis tanah : tanah liat, berpasir, berbatu dan lain-lain.
- Lapisan tanah : berlapis-lapis dengan tahanan berbeda atau uniform.
- Kelembaban tanah.
- Suhu.

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, dapat dilakukan dengan menanam elektroda pentanahan sampai mencapai kedalaman tertentu dimana terdapat air tanah yang konstan. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata-rata untuk keperluan perencanaan diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu tertentu. Setelah

diperoleh harga tahanan jenis tanah maka diambil harga yang paling tinggi pada suatu kondisi tanah.

Karena kadang kala penanaman memungkinkan kelembaban dan suhu

bervariasi, harga tahanan jenis tanah harus diambil untuk keadaan yang paling buruk yaitu tanah kering dan dingin. Berikut ini tabel 2.2 memperlihatkan tahanan jenis tanah rata-rata untuk bermacam-macam jenis tanah (PUIL 2000).

Tabel 2.4 Tahanan Berbagai Jenis Tanah

Jenis Tanah	Tahanan Jenis Tanah (ohm-meter)
Tanah rawa	30
Tanah liat dan tanah lading	100
Pasir basah	200
Kerikil basah	500
Pasir dan kerikil kering	1000
Tanah berbatu	3000

Sumber: (PUIL, 2000)