



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Salah satu faktor kunci dalam setiap usaha pengamanan (perlindungan) rangkaian listrik adalah pentanahan. Apabila suatu tindakan pengamanan/perlindungan yang baik akan dilaksanakan, maka harus ada system pentanahan yang dirancang dengan benar. Prinsip-prinsip atau standar pentanahan yang biasa digunakan telah banyak tertulis dalam laporan-laporan berbagai organisasi nasional yang berkaitan.

Agar system pentanahan dapat bekerja efektif, harus memenuhi persyaratan sebagai berikut (Pabla, 1981:154):

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

2.2 Fungsi dan Tujuan Pentanahan

Fungsi pentanahan adalah untuk mengalirkan arus listrik kedalam tanah melalui suatu elektroda tanah yang ditanam didalam tanah jika terjadi suatu gangguan, disamping itu berfungsi sebagai pengaman manusia dari listrik.

Arus listrik mengalir pada elektroda pentanahan akan mengakibatkan perbedaan tegangan antara elektroda pada suatu titik dengan suatu titik lain dipermukaan tanah. Bila perbedaan maksimum sepanjang permukaan tanah ternyata masih begitu besar, maka kondisi ini sangat tidak menguntungkan karena



membahayakan personil yang sedang bekerja. Perbedaan ini akan dirasakan disekitar peralatan.

Untuk mengurangi pengaruh tersebut maka haruslah dapat dirancang system pentanahan. Adapun tujuan pentanahan peralatan-peralatan listrik yang ditanahkan antara lain (Hutauruk, 1991: 125)

1. Untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang tidak dilalui arus dan antara bagian-bagian ini dengan tanah sampai pada suatu titik aman untuk semua kondisi operasi normal atau tidak normal.
2. Untuk memperkecil bahaya shock pada manusia maupun hewan.
3. Untuk menetralkan grounding tegangan yang terjadi pada permukaan tanah.

2.3 Tahanan Jenis Tanah dan Tipe Tanah

Tanah merupakan campuran dari partikel-partikel cair, padat dan gas. Susunan tanah itu sendiri memberikan suatu petunjuk yang baik pada tingkat mana tahanan jenis tanah itu akan diperkirakan. Tahanan jenis tanah dipengaruhi oleh berbagai macam faktor, oleh karena tahanan jenis tidak dapat diberikan sebagai suatu nilai yang ditetapkan. Sering dicoba untuk mengubah komposisi tanah dengan memberikan garam pada tanah yang dekat pada elektroda pentanahan, dengan maksud mendapat jenis tanah yang renda.

Cara ini hanya baik untuk sementara, sebab proses penggaraman harus dilakukan secara periodik sedikit-dikitnya enam bulan sekali. Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah yang konstan. Pada sistem pentanahan tidak perlu ditanam lebih dalam sehingga mencapai air tanah yang konstan, maka variasi tanah sangat besar, karena kadangkala dipengaruhi oleh temperatur 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 2.1 di bawah ini.



Tabel 2.1 Tahanan jenis bermacam-macam tanah (PUIL 1987, pasal 320-1)

JENIS TANAH	TAHANAN JENIS TANAH (ohm-m)
Tanah Rawa	30
Tanah Liat dan Tanah Ladang	100
Pasir Basah	200
Kerikil Basah	500
Pasir dan Kerikil Kering	1000
Tanah Berbatu	3000
Air Laut dan Air Tawar	5-10

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

Pengukuran tahanan jenis tanah pada lokasi gardu induk diambil dari titik lokasi. Tahanan jenis tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus tertulis

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot R$$

Dimana:

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

D = jarak antara batang elektroda yang terdekat (meter)

R = besar tahanan yang diukur (ohm)

2.4 Pentanahan Sistem

Pentanahan sistem adalah pentanahan dari titik yang merupakan bagian dari jaringan listrik, misalnya titik netral generator atau transformator atau titik pada hantaran tengah atau hantaran netral. Suatu gangguan bumi (*Ground Fault*) pada salah satu bagian dari salah satu sistem harus dapat dilokalisasi dan dapat diamankan tanpa mematikan atau mengganggu keseluruhan sistem, sehingga keandalan dan kontinuitas pelayanan dapat dijamin. Dengan dipasangnya sistem pentanahan ini,



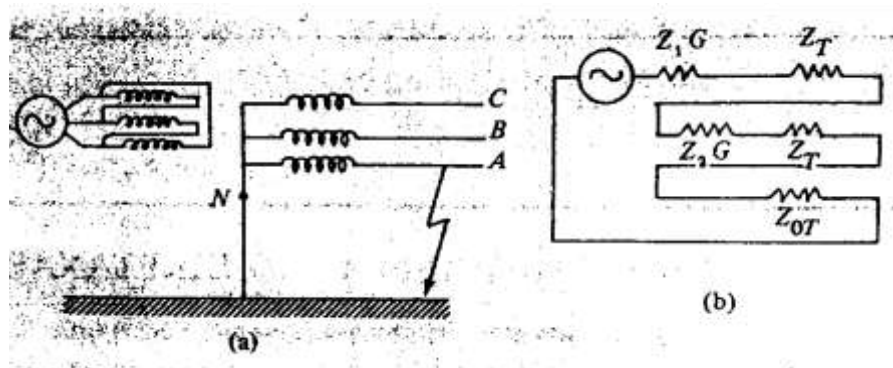
maka dapat diharapkan gangguan yang terjadi dapat dibatasi terjadi pada grup sistem yang bersangkutan saja. (Hutauruk, 1991)

Metode-metode pentanahan dari sistem tenaga adalah:

1. Pentanahan langsung / tanpa impedansi (*Solid Grounding*)

Pada sistem-sistem yang diketanahkan tanpa impedansi, bila terjadi gangguan tanah selalu mengakibatkan terganggunya saluran (*line outage*), yaitu gangguan itu harus diisolir dengan membuka pemutus daya. Salah satu tujuan dengan mengetanahkan titik netral secara langsung ialah untuk membatasi tegangan dari fasa-fasa yang tidak terganggu bila terjadi gangguan kawat-tanah.

Untuk menyelidiki tegangan fasa-fasa yang tidak terganggu itu marilah kita tinjau suatu sistem yang terdiri dari generator, transformator, dan kawat transmisi. Netral sekunder transformator itu diketanahkan tanpa impedansi. Dimisalkan bahwa gangguan kawat-tanah itu terjadi pada jepitan transformator, Gambar 2.1. Jadi dalam gambar jala-jala urutan, kawat transmisi itu tidak lagi termasuk, Gambar 2.1 (b).



Gambar 2.1 Sistem yang diketanahkan tanpa impedansi

(a) Gambar tiga fasa

(b) Gambar ekivalen

Dimisalkan juga bahwa generator itu sangat besar sehingga $Z_{1G} = Z_{2G} =$ sangat kecil dan diabaikan.

Dalam hal gangguan kawat-tanah

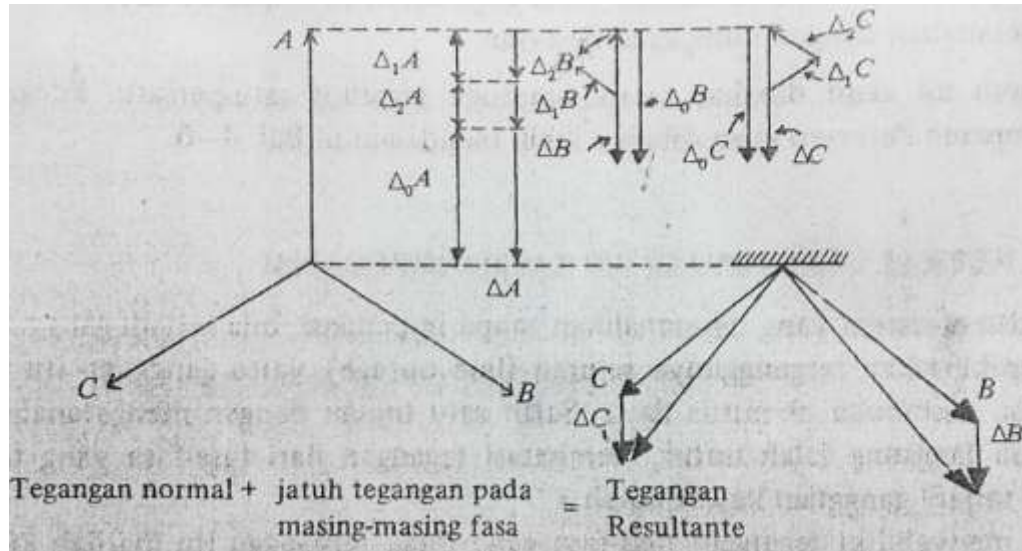
$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{I_{FG}}{3}$$

Anggaplah tegangan pada fasa – A = ΔA jadi,



$$\Delta A = \Delta_1 A + \Delta_2 A + \Delta_0 A$$

Karena $Z_{1T} = Z_{2T}$, maka $\Delta_1 A = \Delta_2 A$



Gambar 2.2 Tegangan kawat-tanah pada keadaan Gambar 2.1

Sekarang akan diselidiki tegangan pada jepitan-jepitan yang tidak terganggu, yaitu jepitan-jepitan fasa – B dan fasa – C. Pada fasa – A ketiga komponen jatuh tegangan itu adalah sefasa (persentase komponen tahanan dimisalkan sama) tetapi pada kedua fasa lain komponen positif dan komponen negatif berputar dengan sudut sebesar 120° , Gambar 2.2. Dari Gambar 2.2 dapat segera dihitung jatuh tegangan fasa –B dan fasa – C yaitu ΔB dan ΔC .

Karena $\Delta A = \Delta_1 A + \Delta_2 A + \Delta_0 A$ dan bila $\Delta_1 A = \Delta_2 A$,

Maka $\Delta B = \Delta C = \Delta_0 A - \Delta_1 A$.

Sekarang bila dilakukan superposisi, maka:

$A + \Delta A = 0$ (tegangan jepitan fasa – A = nol) sedang tegangan pada fasa-fasa yang lain menjadi $B + \Delta B$ dan $A + \Delta C$, dan

$$\begin{aligned}\Delta A &= -\frac{I_{FG}}{3}(Z_1 + Z_2 + Z_0) \\ &= -\frac{I_{FG}}{3}(2Z_1 + Z_0)\end{aligned}$$

Sebutlah,

$$\Delta B = \Delta C = \Delta$$

Maka

$$\Delta = -\frac{I_{FG}}{3}(Z_0 - Z_1)$$



Dimana,

$$\frac{I_{FG}}{3} = \frac{E_{ph}}{(2Z_1 + Z_0)}$$

Dari persamaan (2.5) jelas kelihatan bahwa tegangan dari fasa-fasa yang tidak terganggu itu tidak sama dengan tegangan fasa netral, tetapi lebih besar dan tergantung dari $Z_0 - Z_1$. Makin besar perbedaan $Z_0 - Z_1$ makin besar tegangan pada fasa-fasa B dan C. Substitusi persamaan (2.6) dan (2.5) diperoleh

$$\Delta = -E_{ph} \frac{Z_0 - Z_1}{(2Z_1 + Z_0)}$$

Sebutlah:

$$k = Z_0/Z_1$$

maka

$$\Delta = -E_{ph} \frac{k-1}{k+2}$$

Jadi besar tegangan dari fasa-fasa yang tidak terganggu itu tergantung dari faktor $k = Z_0/Z_1$.

2. Pentanahan melalui reaktansi (*Reactor Grounding*)

Pada persamaan (2.8) itu tidak terbatas hanya pada sistem netralnya yang diketanahkan tanpa impedansi, tetapi meliputi juga pengetanahan netral melalui reaktansi, dan juga melalui kapasitor, dalam hal terakhir ini k berharga negatif. Tegasnya sesuatu harga reaktansi pengetanahan antara nol dan tak terhingga.

Persamaan (2.8) diatas hanya memerlukan satu syarat yaitu $Z_1 = Z_2$, dalam mana termasuk impedansi antara titik gangguan dan titik netral. Pada Z_0 termasuk juga impedansi antara titik netral dan tanah. Di samping syarat diatas persentase tahanan dalam Z_1 , Z_2 , dan Z_0 dimisalkan sama atau sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Sekarang akan ditinjau dari beberapa keadaan:

a) Titik netral diisolir, $k = \infty$

$$\Delta = -E_{ph}$$

$$B = C = \sqrt{3}E_{ph}$$



b) Titik netral diketanahkan tanpa impedansi

i. Hubungan transformator delta-wye

$$Z_{1T} = Z_{2T} = Z_{0T}$$

$$k = Z_0/Z_1 = 1$$

$$\Delta = 0$$

$$\text{Jadi } B = C = E_{ph}$$

ii. Hubungan transformator Y- Y

Dalam hal ini harga k sekitar 10, jadi bila transformator itu diketanahkan bukanlah dimaksudkan untuk membatasi tegangan fasa-fasa yang tidak terganggu.

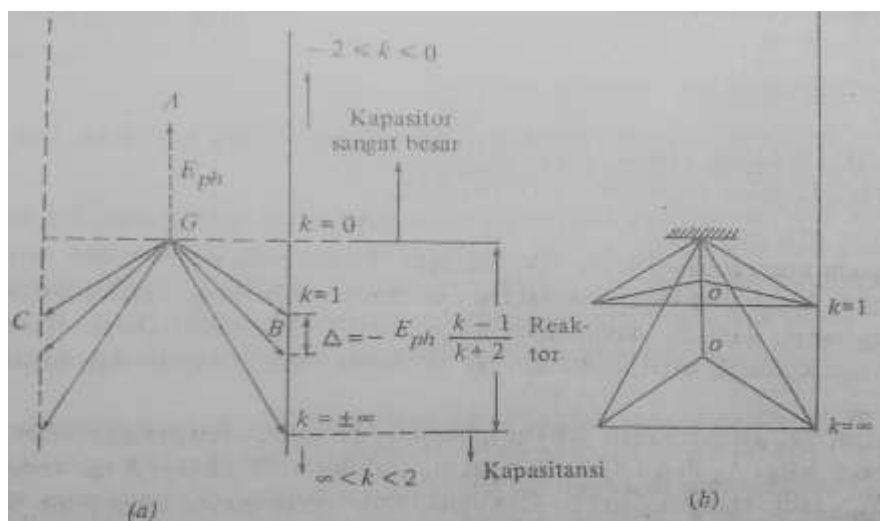
c) Impedansi urutan nol, Z_0 , sama dengan nol

Dalam hal ini $k = 0$, dan $\Delta = E_{ph}/2$, jadi

$$B = C = \frac{1}{2} \sqrt{3} E_{ph}$$

Keadaan dimana $Z_0 = 0$ diperoleh pada suatu sistem yang disuplai oleh suatu generator yang netralnya langsung diketanahkan. Dalam hal ini X_0 mungkin sangat kecil dibandingkan dengan X_1 , sedang X_1 tidak begitu banyak berbeda dengan X_2 .

Daerah dimana $-2 \leq k \leq 0$, merepresentasikan pengetanahan melalui kapasitor yang sangat besar. Dalam keadaan $k = -2$ terdapat resonansi antara kapasitor pengetanahan dan $2 X_1$. Dari Gambar 2.3 dapat dilihat bagaimana tegangan fasa – fasa yang tidak terganggu itu berubah dengan perubahan harga k .



Gambar 2.3 Gangguan tanah pada sistem



(a) Pengetanahan dengan reaktansi, konstruksi tempat kedudukan tegangan untuk garga $k = Z_0/Z_1$ yang berubah-ubah.

(b) Segi – segi tegangan pada keadaan $k = 1$ dan $k = \infty$.

Bila antara titik netral dan titik gangguan itu terdapat kawat transmisi harga k makin besar karena X_0 lebih besar dari X_1 untuk kawat transmisi, jadi harga Δ pun diperbesar. Sebaliknya, penambahan hubungan tanah tidak hanya mengurangi harga k (jadi membatasi kenaikan tegangan fasa-fasa yang tidak terganggu), tetapi bersamaan dengan itu memperbesar arus gangguan.

3. Pentanahan melalui tahanan (*Resistance Grounding*)

Dari sirkuit ekuivalen sama seperti Gambar 2.1 dan Gambar 2.2, tetapi dengan $Z_1 = j X_1$, $X_2 = j X_2$, dan $Z_0 = 3 R_G$ arus gangguan I_{FG} dapat ditentukan dari

$$E_{ph} = \frac{I_{FG}}{3} (2 j X_1 + 3 R_G) \text{ dengan } X_1 = X_2 \text{ dan tahanan } R_1 \text{ dan } R_2 \text{ diabaikan.}$$

Jatuh tegangan pada tiap fasa dari kedua fasa yang tidak terganggu, analog dengan Gambar 2.2, diperoleh dengan menjumlahkan $I_{FG} \cdot R_G$ dengan $j(I_{FG}/3) X_1$ dan $j(I_{FG}/3) X_2$ setelah kedua komponen ini diputar dengan sudut $\pm 120^\circ$ dan $\pm 120^\circ$. Jatuh tegangan itu adalah

$$\Delta = \frac{-I_{FG}}{3} (3 R_G - j X_1)$$

Maksud dari pengetanahan ini adalah untuk membatasi arus gangguan ke tanah antara 10% hingga 25% dari arus gangguan 3 fasa. Batas yang paling bawah adalah batas minimum untuk dapat bekerjanya rele gangguan tanah, sedangkan batas atas adalah untuk membatasi banyaknya panas yang hilang pada waktu terjadi gangguan.

4. Pentanahan melalui kumparan Petersen

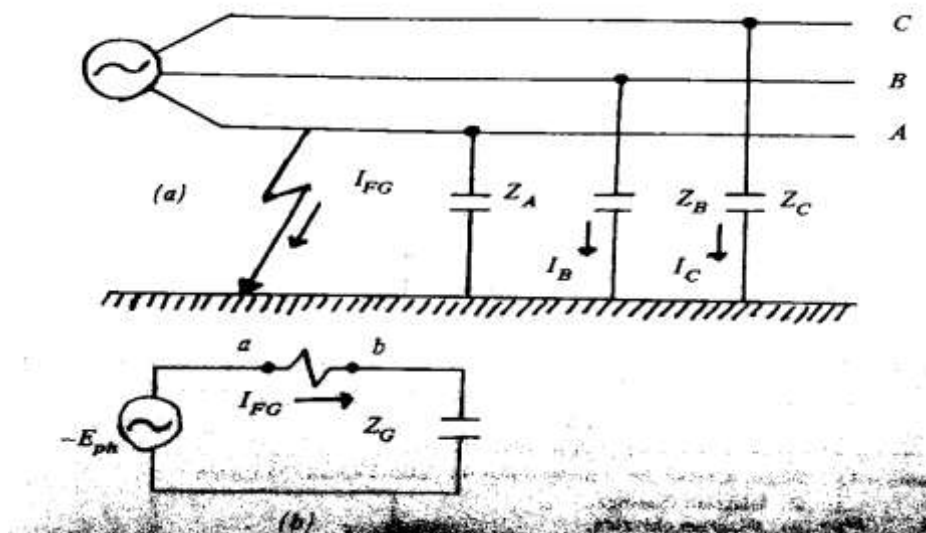
Istilah kumparan Petersen berasal dari nama orang yang pertama kali menciptakan alat itu, yaitu W. Petersen. Di negara – negara Anglo – Saxon nama alat itu sering juga disebut “Ground Fault Neutralizer” atau “Arc Suppresion Coil”. Di Indonesia mengenalnya sebagai kumparan Petersen atau “Petersen Spoel”.



Bila suatu sistem yang tidak diketanahkan terganggu oleh hubung singkat kawat – tanah, maka arus gangguan kapasitif itu kembali ke sistem melalui gangguan itu, Gambar 2.4.

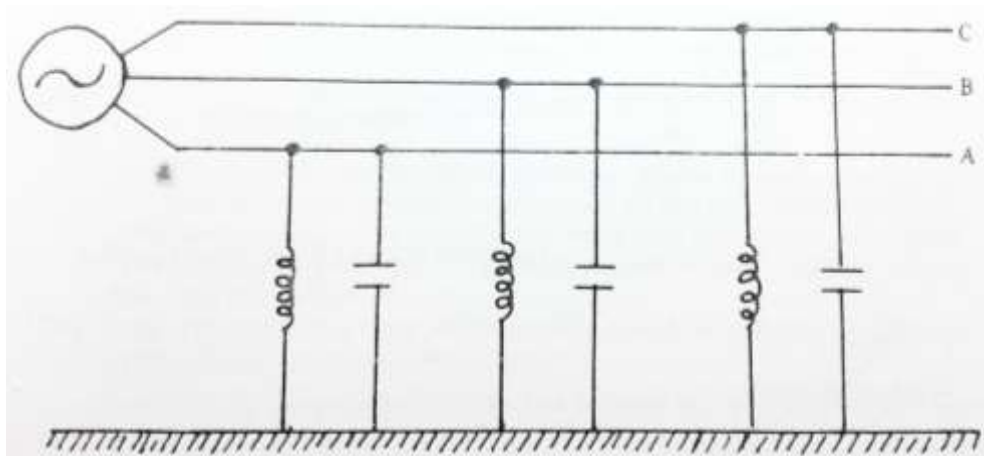
Suatu keadaan istimewa ialah bila ada dua macam arus gangguan yang sama besarnya tetapi berlawanan arahnya terjadi pada gangguan itu, jadi satu sama lain saling menghilangkan. Hal ini terjadi bila pada arus gangguan yang kapasitif itu ditambahkan arus yang induktif yang tertentu besarnya.

Untuk memperoleh arus induktif itu ditambahkan reaktor paralel dengan kapasitor pada setiap fasa ke tanah. Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Sistem yang tidak diketanahkan dalam keadaan gangguan kawat-tanah.

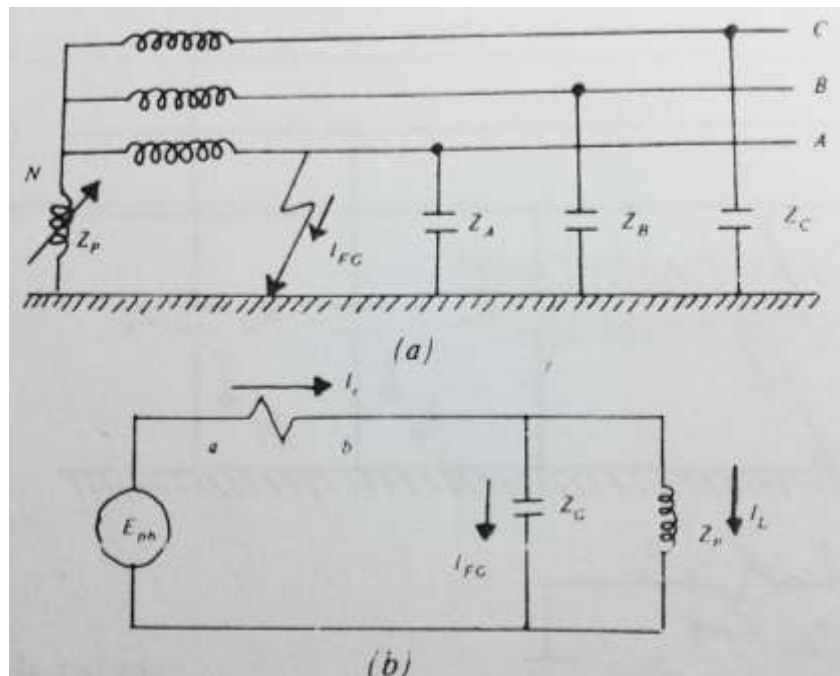
- (a) Sistem fasa-tiga pada keadaan gangguan
- (b) Gambar ekuivalen pada keadaan gangguan



Gambar 2.5 Sistem fasa-tiga dengan reaktor fasa

Tetapi cara ini bukanlah pemecahan yang ekonomis, karena dalam hal ini dibutuhkan tiga reaktor yang tidak akan jenuh dan induktansinya harus konstan.

Bila reaktor itu dihubungkan ke titik netral sistem, umumnya dipilih netral sekunder transformator, maka dalam hal ini dibutuhkan hanya satu reaktor, Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Sistem grounding melalui reaktor dalam keadaan gangguan

- (a) Diagram fasa-tiga
- (b) Diagram ekuivalen



Gambar 2.6 diatas menggambarkan sirukuit ekuivalen sistem itu dalam keadaan gangguan kawat-tanah. Bila reaktor itu punya kesanggupan untuk dapat mengatur impedansinya di samping adanya sadapan, alat ini dinamakan kumparan petersen. Sebutlah impedansi reaktor itu Z_p , maka arus melalui reaktor I_L , dimana

$$I_L = \frac{E_{ph}}{Z_p} = \frac{E_{ph}}{wL} \quad (L = \text{induktansi reaktor})$$

Dan arus kapasitif,

$$\begin{aligned} I_{FG} &= E_{ph} \sum w C_e \quad (C_e = \text{kapasitansi sistem ke tanah, dan } \sum C_e = C_o) \\ &= E_{ph} w C_o \end{aligned}$$

Bila dipenuhi kondisi,

$$wL = \frac{1}{w C_o}$$

maka arus yang mengalir dari sistem melalui kapasitansi pada satu pihak dan melalui reaktor netral pada pihak lain akan saling menetralsir. Jadi dalam hal ini tidak ada arus yang mengalir melalui titik gangguan kecuali komponen arus rugi-rugi dan arus harmonis.

Persamaan (2.12) adalah ekspresi matematika dari hukum petersen, bahwa reaktor pengetanahan harus didimensionir sedemikian rupa sehingga dapat ditala dengan kapasitansi sistem itu.

2.5 Pentanahan Peralatan

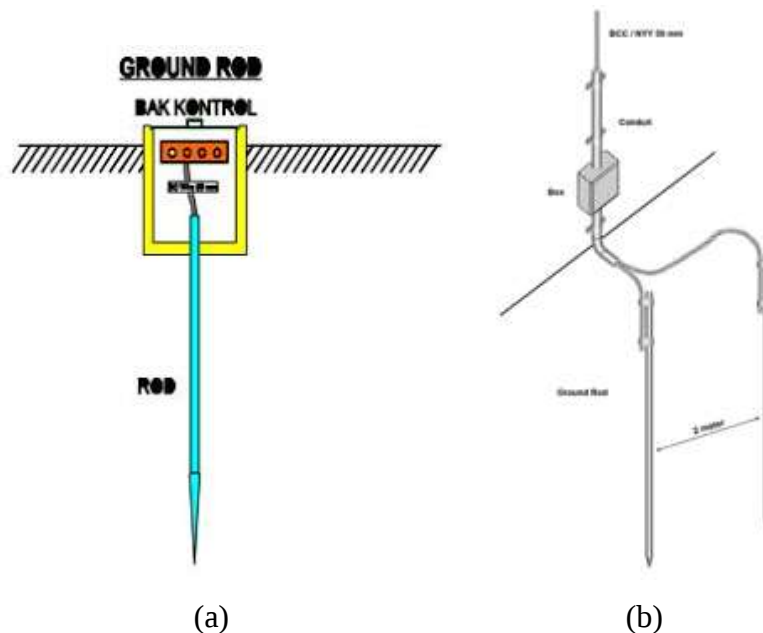
Pentanahan peralatan adalah pentanahan bagian dari peralatan yang pada kerja normalnya tidak dilalui arus. Bila terjadi hubung singkat suatu penghantar dengan suatu peralatan, maka akan terjadi beda potensial (tegangan), yang dimaksud peralatan disini adalah bagian-bagian yang bersifat konduktif yang pada keadaan normal tidak bertegangan seperti bodi trafo, bodi PMS, bodi motor listrik, dudukan batere dan sebagainya. Bila seseorang berdiri ditanah dan memegang peralatan yang bertegangan, maka akan ada arus yang mengalir melalui tubuh orang tersebut yang dapat membahayakan. Untuk menghindari hal ini maka peralatan tersebut perlu ditanahkan, baik pada pembangunan gardu induk, pusat-pusat listrik, industri-industri bahkan rumah tinggal juga perlu dilengkapi dengan sistem



pentanahan ini. Pentanahan peralatan umumnya menggunakan pentanahan rod dan pentanahan grid.

Pentanahan rod yaitu sistem pentanahan yang menanamkan elektroda pentanahan tegak lurus terhadap permukaan tanah. Fungsinya hanya untuk mengurangi atau memperkecil resistansi pentanahan. Untuk memperkecil resistansi pentanahan, maka jumlah dari penanaman batang elektroda pentanahan dapat diperbanyak. Hal ini dapat menguntungkan karena jika terjadi arus gangguan ke tanah maka arus tersebut bisa dialirkan dengan cepat ke dalam tanah.

Selain itu salah satu cara untuk memperkecil resistansi pentanahan ini bisa dilakukan dengan cara memparalelkan batang-batang elektroda yang ditanam, sehingga jika terjadi arus gangguan distribusi tegangan ke tanah atau bumi dialirkan secara merata antar elektroda satu dan yang lainnya. Penanaman batang elektroda tegak lurus terhadap permukaan tanah bisa berbentuk bujur sangkar atau empat persegi panjang dan jarak antar elektroda harus sama. Sedangkan konduktor penghubung antara batang-batang elektroda pentanahan terletak diatas permukaan tanah sehingga tidak diperhitungkan tahananannya atau tahananannya dapat diabaikan. Upaya pemasangan sistem pentanahan peralatan ini harus direncanakan sedemikian rupa agar besar resistansi pada pentanahan peralatan memenuhi ketentuan yang ada. Untuk memperoleh harga tahanan yang lebih kecil maka dapat digunakan batang-batang elektroda yang lebih banyak yang ditanam paralel tegak lurus permukaan tanah. Makin pendek jarak antara elektroda dan makin banyak jumlah yang ditanam maka makin kecil konduktifitasnya. Untuk melihat gambaran dari pentanahan rod dapat dilihat pada gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7 Tipe Sistem Pentanahan Rod

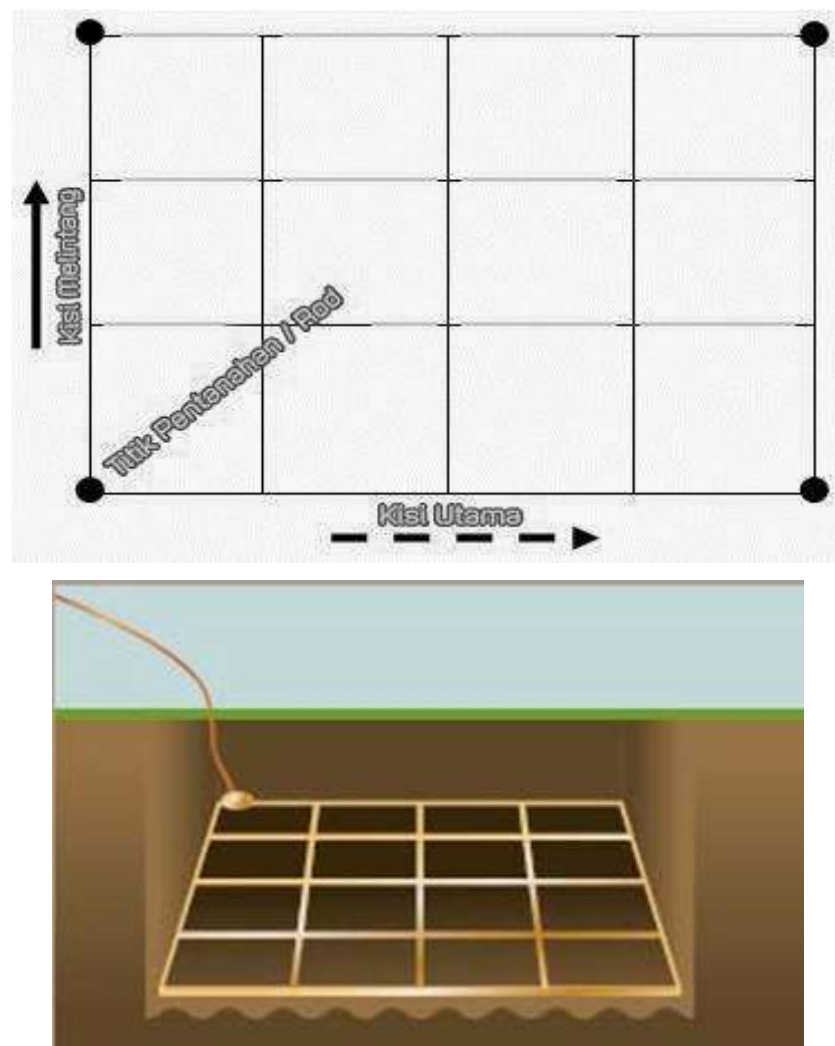
(a) Sistem pentanahan rod, (b) sistem pentanahan rod yang diparalelkan

Pentanahan grid adalah sistem pentanahan dengan penanaman batang-batang elektroda sejajar dibawah permukaan tanah, batang-batang ini terhubung satu sama lain, hal ini bertujuan untuk meratakan tegangan yang mungkin akan timbul. Dengan cara ini bila jumlah elektroda yang ditanam sangat banyak, maka bentuknya mendekati bentuk pelat dan ini merupakan bentuk maksimum atau bentuk yang mempunyai harga resistansi paling kecil untuk luas daerah tertentu. Walaupun demikian pentanahan grid ini kurang efisien, selain pembuatan sistemnya rumit, biaya yang dibutuhkan juga sangat banyak atau mahal. Karena itu perlu dicari bentuk yang sederhana dan murah tetapi tetap mempunyai harga resistansi pentanahan yang memenuhi persyaratan.

Pada sistem ini banyaknya konduktor yang ditanam akan tidak sebanding dengan harga resistansinya karena fungsi konduktor itu sendiri sebenarnya adalah untuk menyalurkan arus gangguan kedalam tanah. Bila konduktor saling berdekatan, volume tanah tidak bisa menerima arus dari konduktor-konduktor tersebut. Dengan kata lain volume tanah mempunyai batasan kemampuan untuk menerima arus.



Pada pentanahan grid umumnya elektroda-elektroda pentanahan ditanam sejajar satu sama lainnya pada kedalaman beberapa puluh sentimeter didalam tanah. Untuk memperkecil harga resistansi pentanahannya harus dilakukan dengan cara memperluas daerah pentanahannya karena dengan cara ini lebih mudah bila dibandingkan dengan cara memperdalam penanaman konduktor. Untuk mempermudah memahami sistem pentanahan grid dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Pentanahan Grid

2.6 Komponen – komponen Pentanahan

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



Hantaran penghubung adalah suatu saluran penghantar (*conductor*) yang menghubungkan titik kontak pada badan atau kerangka peralatan listrik dengan elektroda bumi. Fungsi hantaran penghubung adalah untuk menyalurkan arus gangguan ke elektroda pada system pentanahan. Penghantar yang digunakan dapat berupa penghantar yang berisolasi atau kabel dan juga penghantar yang tidak berisolasi seperti BC (*Bare Conductor*), ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*). Bahan yang digunakan kebanyakan terbuat dari aluminium dan tembaga. Dalam hal pentanahan untuk peralatan sering digunakan penghantar dengan tembaga atau BC.

Antara hantaran penghubung dan elektroda pentanahan harus dipasang sambungan yang dapat dilepas untuk keperluan pengujian resistansi pembumian sehingga penempatan sambungan tersebut harus pada tempat mudah dicapai. Sambungan hantaran penghubung ini dengan elektroda harus kuat secara mekanis dan menjamin hubungan listrik dengan baik misalnya dengan menggunakan penyambungan las, klem, atau baut kunci yang mudah lepas. Klem pada elektroda harus menggunakan baut dengan diameter minimal 10mm². Selain factor diatas yang perlu diperhatikan juga adalah sambungan antar penghantar penghubung dan elektroda pentanahan tersebut juga harus dilindungi dari korosi sehingga daya tahan untuk system pentanahannya bias lama terjamin.

Yang dimaksud dengan elektroda pentanahan adalah sebuah atau sekelompok penghantar yang ditanam dalam bumi dan mempunyai kontak yang erat dengan bumi dan menyertai hubungan listrik dengan bumi. Elektroda pentanahan tertanam sedemikian rupa dalam tanah berupa elektroda pita, logam, batang konduktor, pipa air minum dari tulang besi beton pada tiang pancang. Untuk mendapatkan harga resistansi pentanahan yang serendah mungkin harus memenuhi beberapa persyaratan antara lain

1. Resistansi elektroda pentanahan harus lebih kecil dari pada harga yang direkomendasikan.
2. Elektroda pentanahan harus mampu dialiri arus hubung singkat terbesar.
3. Elektroda pentanahan harus mempunyai sifat kimia yang baik sehingga tidak mudah mengalami korosi.

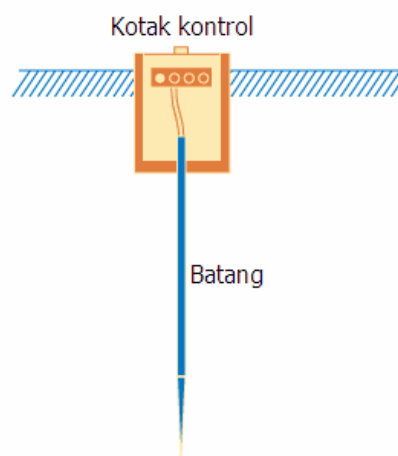


4. Elektroda pentanahan harus mempunyai sifat mekanis yang baik.

Pada umumnya elektroda-elektroda pentanahan ditanam sejajar satu sama lainnya untuk kedalaman beberapa puluh sentimeter didalam tanah. Untuk itu ada beberapa macam elektroda pentanahan yang biasa dipakai seperti elektroda batang, elektroda pita, dan elektroda plat.

1. Elektroda Batang

Elektroda batang adalah elektroda dari batang besi, baja profil atau batang logam lainnya yang ditanam didalam tanah. Biasanya digunakan dari bahan – bahan tembaga, baja tahan karat (*Stainless Steel*) atau baja yang digalvanis (*Galvanized Steel*). Perlu diperhatikan pula dalam pemilihan bahan agar dihindarkan kopeling galvanis (*Galvanic Couple*) yang dapat menyebabkan korosi. Pemasangan elektroda batang dimasukkan tegak lurus kedalam tanah dan panjangnya disesuaikan dengan resistansi pembumian yang diperlukan. Resistansi pembumiannya sebagian besar tergantung pada panjangnya dan sedikit bergantung pada ukuran penampangnya. Jika beberapa elektroda diperlukan untuk memperoleh resistansi pembumian yang rendah, jarak antara elektroda tersebut minimum harus dua kali panjang elektrodanya. Elektroda batang yang digunakan ini harus digalvaniskan (Sumardjati, 2008: 168). Untuk mempermudah dalam memahami konsep elektroda batang dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Elektroda Batang



2. Elektroda Pita

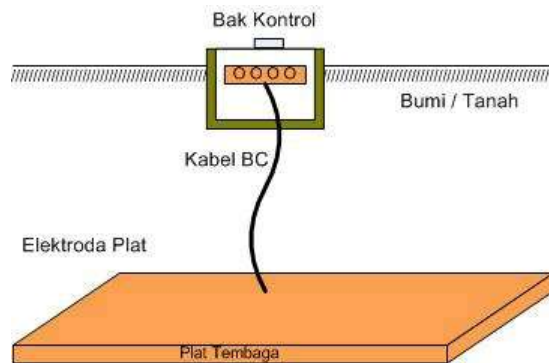
Elektroda pita adalah elektroda yang dibuat dari hantaran berbentuk pita atau berpenampang bulat atau hantaran pilin yang pada umumnya ditanam secara dalam. Pemancangan ini akan bermasalah apabila mendapat lapisan – lapisan tanah yang berbatu, disamping sulit pemancangannya, untuk mendapatkan nilai tahanan yang rendah juga bermasalah. Ternyata sebagai pengganti pemancangan batang hantaran secara vertical ke dalam tanah, dapat dilakukan dengan menanam batang hantaran secara mendatar dan dangkal. Disamping kesederhanaannya itu, ternyata tahanan pentanahan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh bentuk konfigurasi elektrodanya, seperti dalam bentuk melingkar, radial atau kombinasi antara keduanya (Sumardjati, 2008: 168). Gambar 2.10 berikut ialah contoh dari elektroda pita.



Gambar 2.10 Elektroda Pita

3. Elektroda Plat

Elektroda plat adalah elektroda dari bahan plat logam (utuh atau berlubang) dari kawat kasa. Pada umumnya elektroda ini ditanam dalam tanah. Elektroda ini digunakan bila diinginkan tahanan peralatan yang kecil dan sulit diperoleh dengan menggunakan jenis-jenis elektroda yang lain (Sumardjati, 2008: 169). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2.11 Elektroda Plat

4. Elektroda Pentanahan Jenis Lain

Selain ketiga elektroda pentanahan diatas yaitu elektroda batang, elektroda pita, dan elektroda plat, ada juga jenis elektroda lain yang biasa digunakan sebagai elektroda pentanahan pada peralatan listrik seperti jaringan pipa air minum dan selubung logam kabel.

1. Jaringan Pipa Air Minum

Apabila jaringan pipa air minum dari logam dipakai sebagai elektroda pentanahan maka harus diperhatikan resistansi pembumiannya dapat menjadi besar akibat digunakannya pipa sambungan atau flens dari bahan isolasi. Jika pipa air minum dari logam dipakai sebagai elektroda pentanahan, maka ujung pipa kedua sisi meteran harus dihubungkan dengan pipa tembaga yang berlapis timah dengan ukuran minimum 16mm^2 atau dengan pita baja yang digalvanisasi dengan ukuran 25mm^2 .

2. Selubung Logam Kabel

Selubung logam kabel yang tidak dibungkus dengan bahan isolasi yang langsung ditanam dalam tanah boleh dipakai sebagai elektroda bumi. Jika selubung logam tersebut kedua sisi sambungan yang dihubungkan dengan selubung logam tersebut dan luas penampang penghantar itu minimal sebagai berikut :



- 4mm² tembaga untuk kabel dengan penampang inti sampai 6mm².
- 10mm² tembaga untuk kabel dengan penampang inti 10mm² atau lebih.

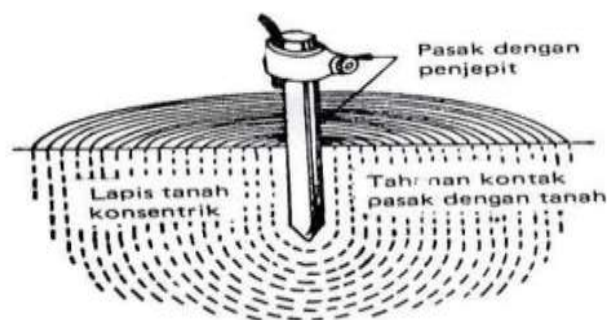
2.7 Sifat – Sifat Dari Sebuah Sistem Elektroda Tanah

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 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 pentahanan.

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. Marilah kita tinjau suatu elektroda (pasak) yang ditanam di tanah yang terdiri atas lapisan-lapisan tanah dengan ketebalan yang sama. Gambar 2.12 berikut akan menjelaskan komponen-komponen dari tahanan elektroda tanah yang biasa digunakan.



Gambar 2.12 Komponen-komponen tahanan elektroda tanah



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 (Pabla, 1981: 158).

2.8 Pengaruh Tahanan Tanah Terhadap Tahanan Elektroda

Tahanan elektroda pentanahan ke tanah tidak hanya tergantung pada kedalaman dan luas permukaan elektroda, tetapi juga pada tahanan tanah. Tahanan tanah merupakan 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.

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. Karena kandungan air dan suhu lebih 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 kedalaman pasak mencapai tingkat kandungan air yang tetap (Pabla, 1981: 159).



2.9 Ukuran – ukuran Penghantar Tanah

Penghantar-penghantar dan elektroda-elektroda baja digunakan untuk saluran distribusi dan pentanahan substation. Luas minimum penghantar yang diperlukan dapat dicari dari rumus empiris berikut ini

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

Dimana :

I = arus gangguan (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 minimum penghantar baja plat strip tidak boleh kurang dari $10 \times 6 \text{ mm}^2$ dan untuk ketahanan terhadap korosi pemilihan penghantar dapat mempertimbangkan hal-hal berikut :

- Untuk tanah yang bersifat korosif sangat lambat, dengan tahanan diatas 100 ohm-m, tidak ada batas perkenan korosi (*corrosion allowance*).
- 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.
- Untuk tanah yang bersifat korosif cepat, dengan tahanan kurang dari 25 ohm-m, batas perkenan korosi adalah 30% dengan pemilihan penghantar sudah mempertimbangkan factor stabilitas termal.

Dibandingkan dengan sambungan sekrup, pada sambungan las dapat timbul sedikit korosi pada sambungan oleh bahan las atau teknik pengelasannya sendiri. Hindarkan 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 $65 \times 8 \text{ mm}^2$ (Pabla, 1981: 161).



2.10 Tahanan Elektroda Tanah

Besar tahanan dari berbagai elektroda tanah telah ditentukan oleh hasil-hasil.

Rumus pentanahan :

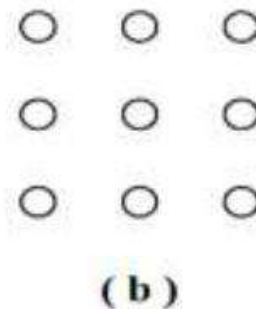
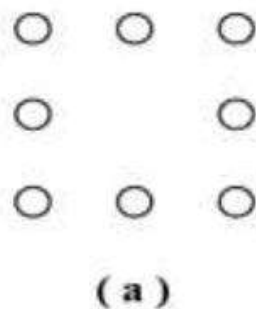
Elektroda partikal ditanam pada permukaan tanah pasak tunggal

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

1. Dua pasak dipasang parallel

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

$$\text{Dimana } x = \left(\frac{L}{\ln 48L/a} - 1 \right) / d, \text{ d jarak antara 2 pasak paralel} \dots \dots \dots (2.3)$$



Gambar 2.13 Elektroda tanah: (a) Dalam susunan segi empat kosong, (b) Dalam susunan segi empat terisi

2. Tiga pasak parallel berbentuk segitiga samasisi dengan sisi = d

$$\frac{\text{Tahanan 3 pasak paralel}}{\text{Tahanan pasak tunggal}} = \frac{1+2x}{3} \dots \dots \dots (2.4)$$

3. Pasak jamak tersusun dalam segi empat kosong atau segi empat terisi.

Apabila jumlah pasak adalah N, maka:

$$\frac{\text{Tahanan N pasak paralel}}{\text{Tahanan pasak tunggal}} = \frac{1+kx}{N} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

a = jari-jari elektroda pentanahan (m)

ρ = resistifitas tanah (ohm)

R = tahanan pasak ke tanah (ohm)



L = panjang pasak tanah (cm)

N = banyaknya elektroda pentanahan

Dimana k adalah konstanta yang tergantung jumlah pasak, dapat dilihat tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2 Harga Konstanta Pada Jumlah Pasak Atau Elektroda (Pabla, 1981: 164)

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

2.11 Pengukuran Secara Langsung

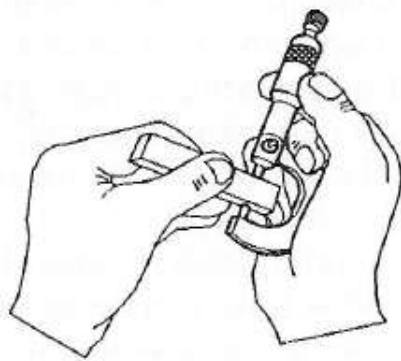
Pengukuran secara langsung ialah proses pengukuran dengan memakai alat ukur langsung. Hasil pengukuran langsung terbaca. Merupakan hal yang lebih dipilih seandainya memungkinkan. Proses pengukuran dapat cepat diselesaikan. Alat ukur langsung umumnya memiliki kecermatan yang rendah dan pemakaiannya dibatasi, adapun hal yang membatasinya adalah sebagai berikut:

- Karena daerah toleransi $\leq$ kecermatan alat ukur,
- Karena kondisi fisik objek ukur yang tidak memungkinkan digunakannya alat ukur langsung



- Karena tidak cocok dengan imajinasi ragam daerah toleransi (tidak sesuai dengan jenis toleransi yang diberikan pada objek ukur misalnya toleransi bentuk dan posisi sehingga memerlukan proses pengukuran khusus.

Contoh pengukuran langsung adalah pengukuran tebal objek ukur dengan memakai mikrometer (a), dan pengukuran tahanan pentanahan dengan menggunakan earth tester (b) yaitu dapat dilihat pada Gambar 2.14. (a) dan (b)



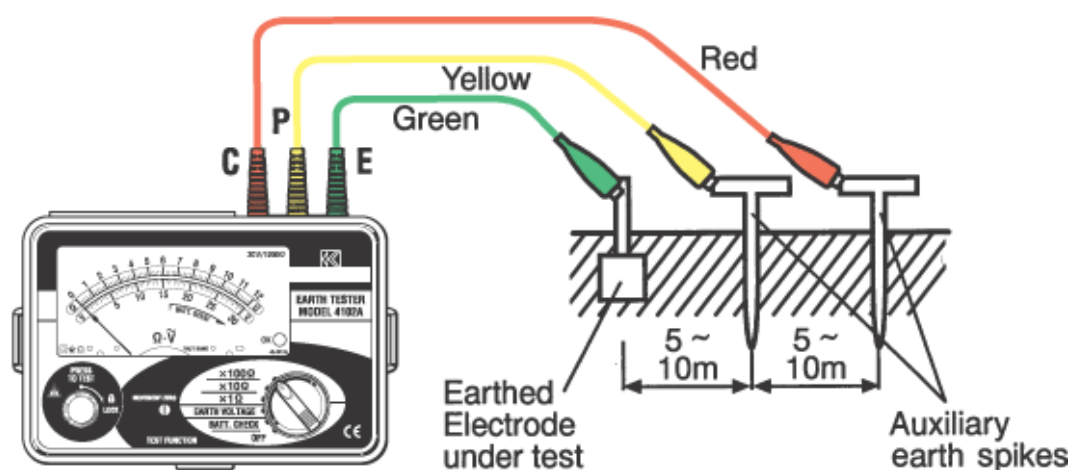
(a)



(b)

Gambar 2.14 Pengukuran langsung

Berikut ialah contoh dari diagram pengawatan earth tester terhadap elektroda yang akan diukur.

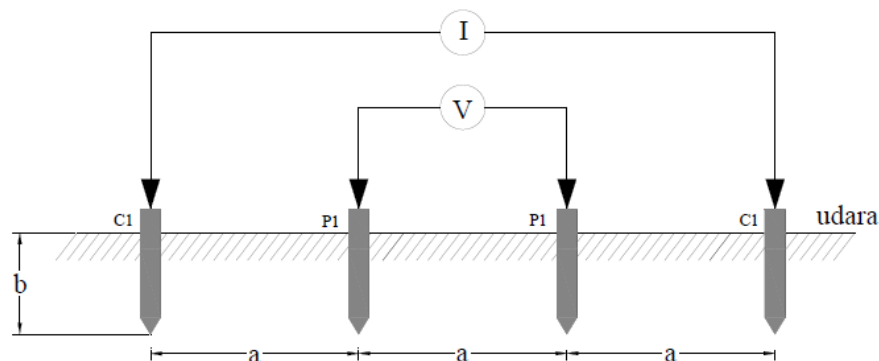


Gambar 2.15 Diagram pengawatan earth tester terhadap elektroda yang diukur



2.12 Pengukuran Secara Tak Langsung

Pengukuran tidak langsung merupakan proses pengukuran yang dilaksanakan dengan memakai beberapa jenis alat ukur berjenis komparator/pembanding, standar dan bantu. Perbedaan harga yang ditunjukkan oleh skala alat ukur dibandingkan dengan ukuran standar (pada alat ukur standar) dapat digunakan untuk menentukan dimensi objek ukur. Karena alat ukur pembanding umumnya memiliki kecermatan tinggi, sementara itu alat ukur standar memiliki kualitas (ketelitian) yang bisa diandalkan, maka proses pengukuran tidak langsung dapat dilaksanakan. Sebaiknya untuk menghasilkan harga yang cermat serta dapat dipertanggungjawabkan (teliti dan tepat). Proses pengukuran tak langsung umumnya berlangsung dalam waktu yang relatif lama. Contoh pengukuran semacam ini ditunjukkan pada Gambar 2.16 dengan alat ukur voltmeter dan amperemeter, karena untuk menemukan nilai tahanan yaitu dengan membandingkan harga tegangan dibagi dengan harga arus yang didapat.



Gambar 2.16 Pengukuran secara tak langsung tahanan pentanahan dengan voltmeter dan amperemeter

2.13 Alat Ukur Pentanahan

Dalam mengukur pentanahan tentunya diperlukan alat khusus untuk mengukur pentanahan. Terdapat berbagai macam alat ukur pentanahan ada yang analog maupun digital salah alat ukur pentanahan yang digunakan pada GI. Talang



Kelapa adalah SEW 4120 ER Digital Earth Resistance Tester. SEW 4120 ER Digital Earth Resistance Tester memiliki berbagai fitur diantaranya:

1. Dapat mengukur tegangan tanah.
2. Pengukuran arus 2mA membatasi pengetesan resistansi tanah dengan pengaman arus bocor pada rangkaian yang sedang diukur.
3. Test lead tersedia sebagai asesoris standar untuk sistem pengukuran sederhana dua kawat.
4. Fungsi data hold.
5. Pengoperasian dengan baterai.
6. Indikator tes baterai.
7. Standar IEC/EN 61010-1, IEC 61557-5 CAT III 300V.
8. Fungsi kalibrasi dengan test lead yang tersedia.

Berikut ialah contoh gambar dari SEW 4120 ER Digital Earth Resistance Tester.

Gambar 2.17.



Gambar 2.17 SEW 4120 ER Digital Earth Resistance Tester



2.14 Cara Pengukuran Pentanahan Dengan SEW 4120 ER Digital Earth Resistance Tester

Prosedur pengukuran tahanan pentanahan pada transformator daya dengan menggunakan SEW 4120 ER Digital Earth Resistance Tester ialah sebagai berikut:

1. Cek baterai terlebih dahulu, jika terdapat simbol baterai pada layar LED jangan lakukan pengujian.
2. Hubungkan kabel hijau pada terminal E dan ujung satunya hubungkan ke elektroda yang akan diukur.
3. Hubungkan kabel kuning pada terminal P dan ujung satunya hubungkan ke elektroda bantu. Jarak antara elektroda bantu (kuning) dengan elektroda yang akan diukur sejauh 5-10m.
4. Hubungkan kabel merah pada terminal C dan ujung satunya hubungkan ke elektroda bantu. Jarak antara elektroda bantu (merah) dengan elektroda bantu (kuning) sejauh 5-10m, sedangkan jarak antara elektroda bantu (merah) dengan elektroda yang akan diukur sejauh 10-20m.
5. Arahkan switch ke posisi 20Ω .
6. Tekan tombol test dan putar ke arah kanan untuk melihat hasil dari pengukuran.

Prosedur pengukuran ini juga berlaku pada transformator yang sedang beroperasi. Berikut ialah contoh instruksi yang terdapat pada tutup SEW 4120 ER Digital Earth Resistance Tester, dan contoh hasil dari pengukuran. Gambar 2.18.

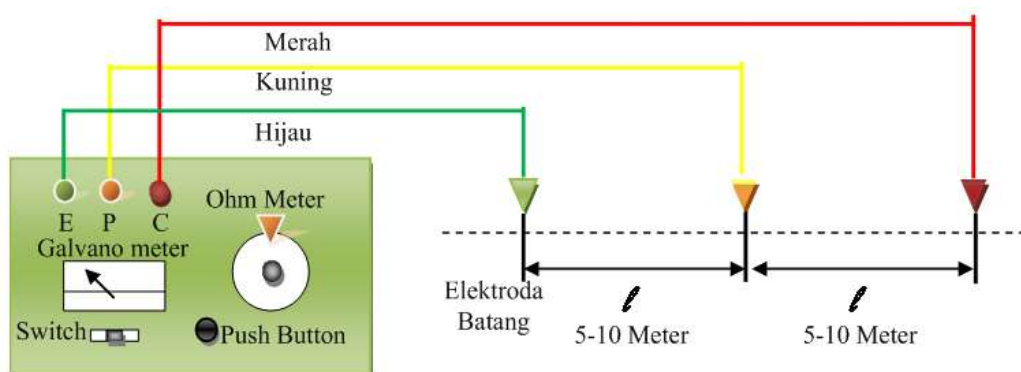


(a)



(b)

Gambar 2.18 (a) Instruksi penggunaan earth resistance tester, (b) contoh hasil pengukuran



Gambar 2.19 Diagram pengawatan earth tester

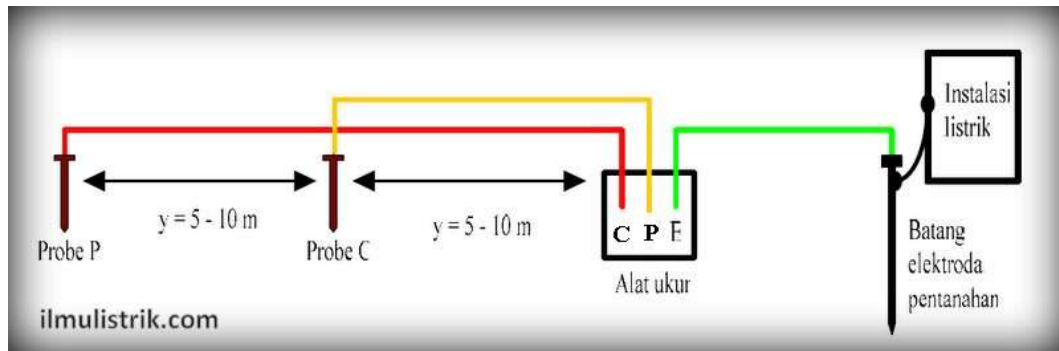
2.15 Konfigurasi Pengukuran Tahanan Pentanahan

Pengukuran tahanan pentanahan diperlukan untuk mengetahui berapa ohm nilai suatu tahanan grounding/ kawat pentanahan, apakah masih layak untuk digunakan atau perlu untuk diperbaiki. Dalam mengukur suatu tahanan pentanahan terdapat tiga konfigurasi pengukuran. Berikut ialah tahap – tahap pengukuran tahanan pentanahan dengan tiga konfigurasi:

1. Hubungkan terminal E (hijau) ke kawat/kabel elektroda pentanahan peralatan yang akan diukur.
2. Tanamkan kedua elektroda alat ukur pentanahan terminal P (kuning) dan C (merah) pada dua titik dalam satu garis lurus dengan jarak P dan

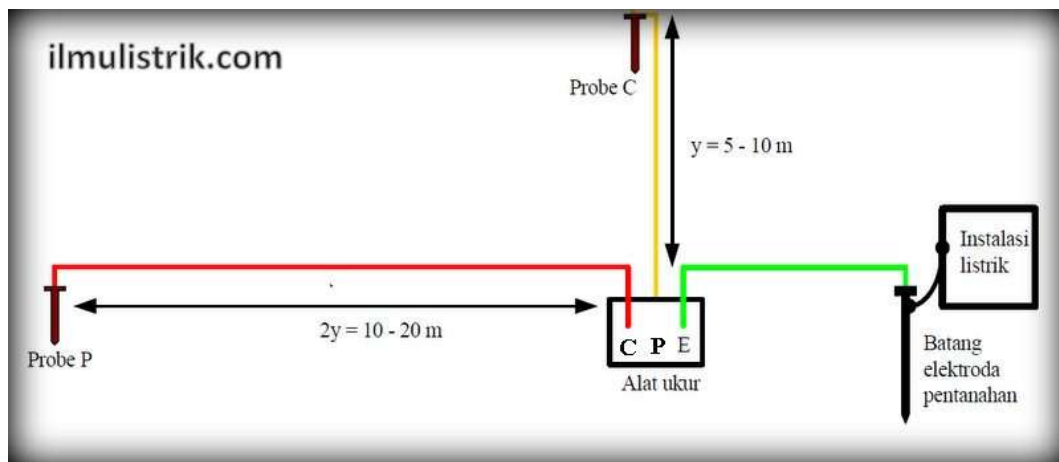


C dua kali jarak yang terdekat dari pentanahan peralatan yang akan diukur (misalnya $E-P = y$ meter, maka $E-C = 2y$ meter, jarak y berkisar 5-10 meter).



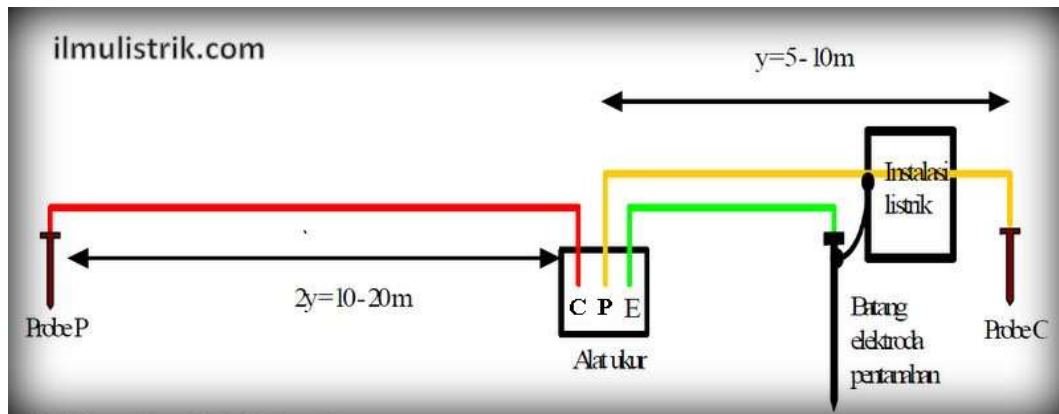
Gambar 2.20 Konfigurasi Pengukuran Dengan Sudut 0°

3. Arahkan selector switch ke batas ukur 20 ohm.
4. Tekan tombol press to test dan putar searah jarum jam.
5. Untuk pengukuran selanjutnya pindahkan probe P (kuning) sehingga tegak lurus terhadap kabel probe E dan C.



Gambar 2.21 Konfigurasi Pengukuran Dengan Sudut 90°

6. Ulangi langkah 3 dan 4.
7. Untuk pengukuran selanjutnya pindahkan probe P (kuning) sehingga berlawanan arah dengan kabel probe C.



Gambar 2.22 Konfigurasi Pengukuran Dengan Sudut 180°

8. Ulangi langkah 3 dan 4.
9. Nilai tahanan pentanahan akhir adalah nilai rata-rata dari ketiga konfigurasi tersebut.