

BAB 10

SISTEM PENTANAHAN JARINGAN DISTRIBUSI

A. Pendahuluan

Sistem pentanahan pada jaringan distribusi digunakan sebagai pengamanan langsung terhadap peralatan dan manusia bila terjadinya gangguan tanah atau kebocoran arus akibat kegagalan isolasi dan tegangan lebih pada peralatan jaringan distribusi. Petir dapat menghasilkan arus gangguan dan juga tegangan lebih dimana gangguan tersebut dapat dialirkan ke tanah dengan menggunakan sistem pentanahan.

Sistem pentanahan adalah suatu tindakan pengamanan dalam jaringan distribusi yang langsung rangkaiannya ditanahkan dengan cara mentanahkan badan peralatan instalasi yang diamankan, sehingga bila terjadi kegagalan isolasi, terhambatlah atau bertahannya tegangan sistem karena terputusnya arus oleh alat-alat pengamanan tersebut.

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

1. Membuat jalur impedansi rendah ketanah untuk pengamanan personil dan peralatan menggunakan rangkaian yang efektif.
2. Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat surja hubung (surge current)
3. Menggunakan bahan tahan terhadap korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah. Untuk meyakinkan kontinuitas penampilan sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
4. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam pelayanannya.

Secara umum tujuan dari sistem pentanahan dan grounding pengamanan adalah sebagai berikut :

1. Mencegah terjadinya perbedaan potensial antara bagian tertentu dari instalasi secara aman.
2. Mengalirkan arus gangguan ke tanah sehingga aman bagi manusia dan peralatan.
3. Mencegah timbul bahaya sentuh tidak langsung yang menyebabkan tegangan kejut.

Sistem pentanahan dapat dibagi dua :

1. Pentanahan sistem (pentanahan netral)
2. Pentanahan umum (pentanahan peralatan)

1. Pentanahan Sistem (netral) berfungsi :
 - a. Melindungi peralatan / saluran dari bahaya kerusakan yang diakibatkan oleh adanya gangguan fasa ke tanah
 - b. Melindungi peralatan / saluran dari bahaya kerusakan isolasi yang diakibatkan oleh tegangan lebih
 - c. Untuk keperluan proteksi jaringan
 - d. Melindungi makhluk hidup terhadap tegangan langkah (step voltage)
2. Pentanahan Umum Berfungsi
 - a. Melindungi makhluk hidup dari tegangan sentuh
 - b. Melindungi peralatan dari tegangan lebih

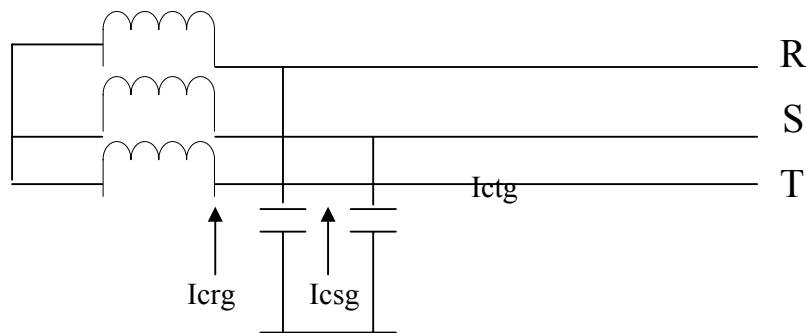
B. Sistem Pentanahan Netral

Walaupun dahulu, banyak sistem distribusi sistem tenaga dioperasikan dengan titik netal tidak ditanahkan, tetapi sekarang praktis untuk mengoperasikan sistem dengan titik netral dihubungkan ketanah (ditanahkan)

Macam pentanahan titik netral

1. Pentanahan langsung (solid)
2. Pentanahan dengan tahanan
3. Pentanahan dengan reaktansi
4. Pentanahan Petersen Coil.

1. Sistem Netral Tidak Ditanahkan



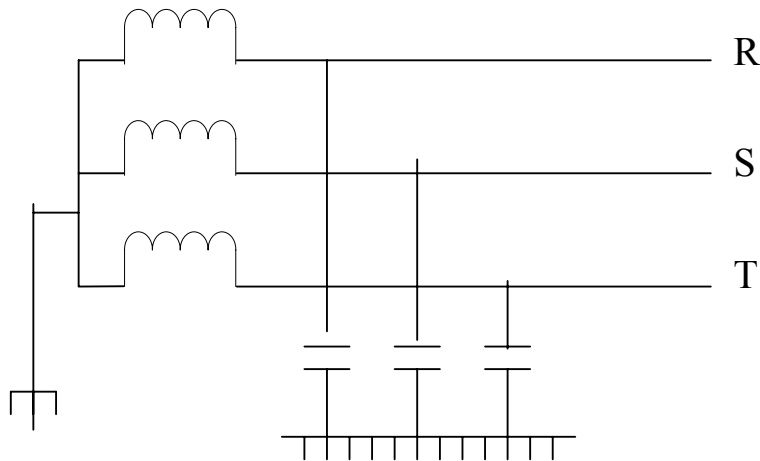
Gambar 126. Sistem netral tidak ditanahkan

Arus I_{ctg} yang mengalir dari fasa yang terganggu ketanah, yang mana mendahului tegangan fasa aslinya kenetral dengan sudut 90° . Akan terjadi busur api (arcing) pada titik gangguan karena induktansi dan

kapasitansi dari system. Tegangan fasa yang sehat akan naik menjadi tegangan line (fasa-fasa) atau 3 kali tegangan fasa, bahkan sampai 3 kali tegangan fasa.

2. Pentanahan Netral Langsung

Pentanahan netral yang sederhana dimana hubungan langsung dibuat antara netral dengan tanah (Gambar 127).



Gambar 127. Pentanahan Netral Langsung (Solid)

Jika tegangan seimbang, juga kapasitansi fasa ke tanah sama, maka arus-arus kapasitansi fasa tanah akan menjadi sama dan saling berbeda fasa 120° satu sama lainnya. Titik netral dari impedansi adalah pada potensial tanah dan tidak ada arus yang mengalir antara netral impedansi terhadap netral trafo tenaga.

3. Pentanahan Titik Netral dengan Tahanan

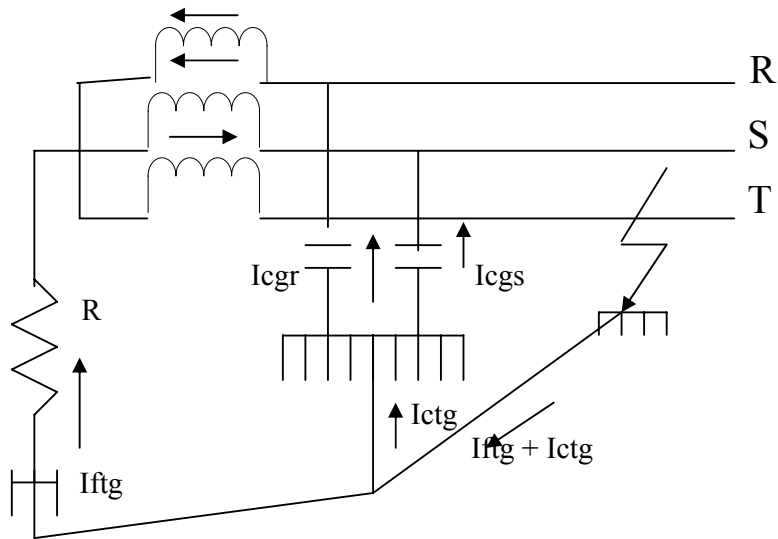
Untuk membatasi arus gangguan tanah, alat pembatas arus dipasang antara titik netral dengan tanah. Salah satu dari pembatas arus ini adalah tahanan dan tahanan ada dua yaitu metalik dan cair (liquid).

Besar dan hubungan fasa arus gangguan I_{fg} tergantung pada-pada harga reaktansi urutan nol dari sumber daya dan harga tahanan dan pentanahan.

Arus gangguan dapat dipecah menjadi dua komponen yaitu yang safasa dengan tegangan ke netral dari fasa terganggu yang lain ke tinggalan 90° .

Komponen yang ketinggalan dari arus gangguan I_{ftg} dalam fasanya akan berlawanan arah dengan arus kapasitif I_{ctg} pada lokasi gangguan.

Dengan pemelihan harga tahanan pentanahan yang sesuai, komponen yang logging dari arua gangguan dapat dibuat sama atau lebih besar dari arus kapasitif sehingga tidak ada oscilasi transien karena dapat terjadi busur api.



Gambar 128. Fasa Tegangan Tanah pada Pentanahan Netral dengan Tahanan

Jika harga tahanan pentanahan tinggi sehingga komponen logging dari arus gangguan kurang dari arus kasitif, maka kondisi sistem akan mendekati sistem netral yang tidak ditanahkan dengan resiko terjadinya tegangan lebih.

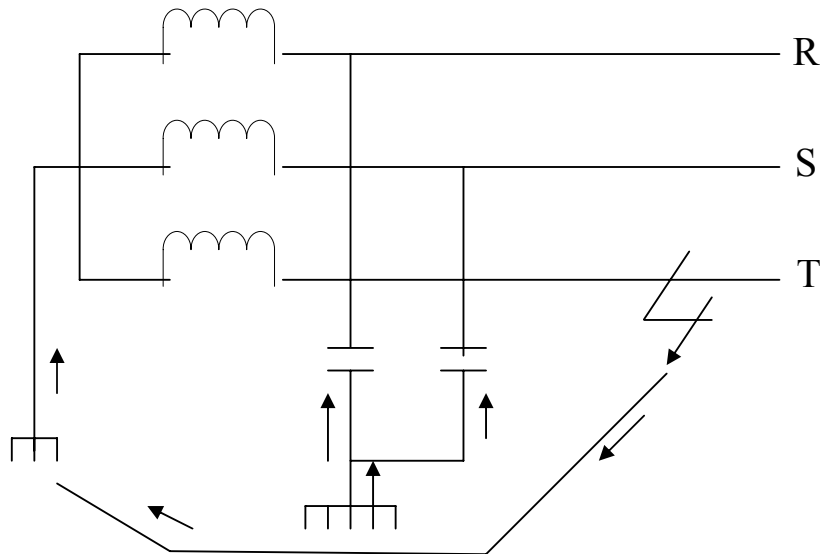
4. Pentanahan Netral Dengan Reaktansi

Suatu sistem dapat dikatakan ditanahkan reatansi bila suatu impedansi yang lebih induktif, disiiapkan dalam titik netral trapo (generator) dengan tanah.

Metode ini mempunyai keuntungan dari pentanahan tahanan :

- Untuk arus gangguan tanah maksimum peralatan reaktor lebih kecil dari resistor.
- Energi yang disisipkan dalam reaktor lebih kecil.

Dengan ketiga tegangan fasa yang dipasang seimbang arus dari masing-masing impedansi akan menjadi sama dan saling berbeda fasa 120^0 satu sama lainnya. Secara konsekuen tidak ada perbedaan pontensial antara titik netral dari suplai trafo tenaga.



Gambar 129. Gangguan fasa T ke tanah pada pentanahan netral langsung

C. Tahanan Jenis Tanah

Faktor keseimbangan antara tahanan pengetanahan dan kapasitansi di sekelilingnya adalah tahanan jenis tanah (ρ). Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tidaklah sama. Beberapa faktor yang mempengaruhi tahanan jenis tanah yaitu:

1. Pengaruh Keadaan Struktur Tanah

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

Tabel 15. Tahanan Jenis Tanah

Jenis Tahan	Tanah Rawa	Tanah Liat dan Ladang	Pasir Basah	Kerikil Basah	Pasir Kerikil Kering	Tanah Berbatu
Tahanan jenis tanah (ohm)	30	100	200	500	1000	3000

2. Pengaruh Unsur Kimia

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

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

3. Pengaruh Iklim

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

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

4. Pengaruh Temperatur Tanah

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

penurunan temperatur yang sedikit saja akan menyebabkan kenaikan harga tahanan jenis tanah dengan cepat.

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

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) \dots \dots \dots (1)$$

dimana:

ρ_t = tahanan jenis tanah pada $t^{\circ}\text{C}$.

ρ_0 = tahanan jenis tanah pada 0°C

α_0 = koefisien temperatur tahanan per $^{\circ}\text{C}$ pada 0°

t = temperatur yang timbul ($^{\circ}\text{C}$)

D. Metode Pengukuran Tahanan Jenis Tanah

Pengukuran tahanan jenis tanah biasanya dilakukan dengan cara:

1. Metode tiga titik (*three-point methode*).

Metode tiga titik (*three-point methode*) dimaksudkan untuk mengukur tahanan pentanahan. Misalkan tiga buah batang pentanahan dimana batang 1 yang tahanannya hendak diukur dan batang-batang 2 dan 3 sebagai batang pengentanahan pembantu yang juga belum diketahui tahanannya, seperti pada gambar 130.

Bila tahanan diantara tiap-tiap batang pengentanahan diukur dengan arus konstan, tiap pengukuran dapat ditulis sebagai berikut :

$$R_{1-2} = \frac{V_{1-2}}{I} = R_{11} + R_{22} - 2R_{12}$$

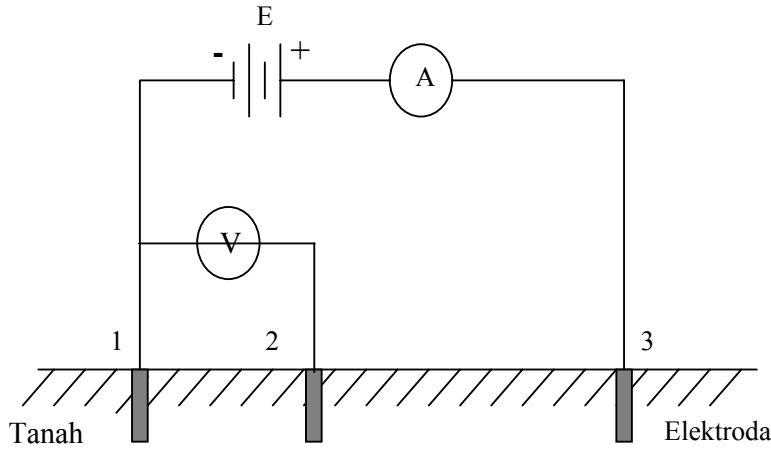
$$R_{1-3} = \frac{V_{1-3}}{I} = R_{11} + R_{33} - 2R_{13}$$

$$R_{2-3} = \frac{V_{2-3}}{I} = R_{22} + R_{33} - 2R_{23}$$

$$\frac{V_{1-2} + V_{1-3} - V_{2-3}}{I} = 2R_{11} - 2R_{12} - 2R_{13} + 2R_{23}$$

$$\text{Tetapi, } V_{1-3} = V_{1-2} + V_{2-3}$$

Jadi: $R = \frac{V_{1-2}}{I} = R_{11} - R_{12} - R_{13} + R_{23}$
 Akhirnya $R_{11} = R + R_{12} + R_{13} - R_{23}$ (2)



Gambar 130. Rangkaian Pengukuran Tahanan Jenis Tanah dengan Metode Tiga Titik.

Tahanan batang pengetanahan dari elektroda 1 dapat dibuat:
 $R_{12} + R_{13} - R_{23} = 0$ (3)

2. Metode empat titik (*four electrode methode*)

Metoda pengukuran yang dipergunakan adalah metoda empat titik seperti gambar 131.

Bila arus I masuk ke dalam tanah melalui salah satu elektroda dan kembali ke elektroda yang lain sehingga pengaruh diameter konduktor dapat diabaikan. Arus masuk ke tanah mengalir secara radial dari elektroda, misalkan arah arus dalam tanah dari elektroda 1 ke elektroda 2 berbentuk permukaan bola dengan jari-jari r , luas permukaan tersebut adalah $2\rho r^2$, dan rapat arus adalah :

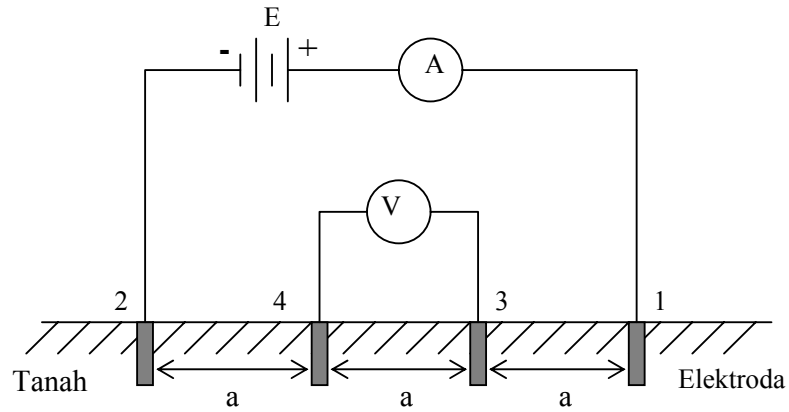
$$J = \frac{I}{2.\pi.r^2}$$

dimana:

J = kerapatan arus [A/m^2]

r = jari-jari [m]

I = arus yang mengalir dalam tanah [A]



Gambar 131. Rangkaian Pengukuran Tahanan Jenis Tanah dengan Metoda Empat Titik

Jika ρ adalah tahanan jenis tanah, maka medan dalam tanah pada arah radial dengan jarak r adalah :

$$E_{(r)} = J \rho \quad [V/m]$$

$$\text{Sehingga menjadi } E_{(r)} = \frac{I}{2\pi r^2} \rho \quad [V/m]$$

Potensial pada jarak r dari elektroda adalah integral dari gaya listrik dari jarak r ke titik tak berhingga:

$$V = \int_r^{\infty} E(r).dr = I \frac{\rho}{2\pi a}$$

Perbandingan antara tegangan dan arus atau tahanan menjadi

$$R = \frac{\rho}{2\pi a}$$

Dari gambar 2, terlihat, $r_{13} = r_{34} = r_{24} = a$,

Jadi

$$V_3 = \rho \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right)$$

Dan

$$V_4 = \rho \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right)$$

Beda tegangan antara 3 dan 4 adalah:

$$V_{34} = \rho \frac{I}{2 \pi} \left[\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) \right]$$

$$V_{34} = I \frac{\rho}{2 \pi a}$$

Dan $R_{34} = \frac{V_{34}}{I} = \frac{\rho}{2 \pi a}$

Sehingga: $\rho = R_{34} (2\pi a)$(4)

dimana:

a = jarak antara elektroda [m]

R_{34} = tahanan antara elektroda 3 dan 4 [Ω]

ρ = tahanan jenis tanah [Ω -m]

E. Elektroda Pentanahan

Elektroda pentanahan adalah penghantar yang ditanam dalam tanah dan membuat kontak langsung dengan tanah. Adanya kontak langsung tersebut bertujuan agar diperoleh pelaluan arus yang sebaik-baiknya apabila terjadi gangguan sehingga arus tersebut disalurkan ketanah.

Menurut PUIL 2000 [3.18.11] elektroda adalah pengantar yang ditanamkan ke dalam tanah yang membuat kontak langsung dengan tanah. Untuk bahan elektroda pentanahan biasanya digunakan bahan tembaga, atau baja yang bergalvanis atau dilapisi tembaga sepanjang kondisi setempat tidak mengharuskan memakai bahan lain misalnya pada perusahaan kimia.

Jenis-jenis elektroda yang digunakan dalam pentanahan adalah sebagai berikut:

1. Elektroda batang

Elektroda batang adalah elektroda dari pipa besi baja profil atau batangan logam lainnya yang dipancangkan ke dalam tanah secara dalam. Panjang elektroda yang digunakan sesuai dengan pentanahan yang diperlukan.

Untuk menentukan besarnya tahanan pembumian dengan satu buah elektroda batang dipergunakan rumus sebagai berikut (Pabla.1994:159):

$$R_{bt} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right)$$
..... (5)

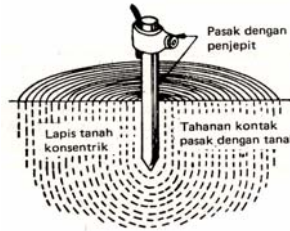
Dimana:

R_{bt} = tahanan pembumian elektroda batang [Ω]

ρ = tahanan jenis tanah [Ω m]

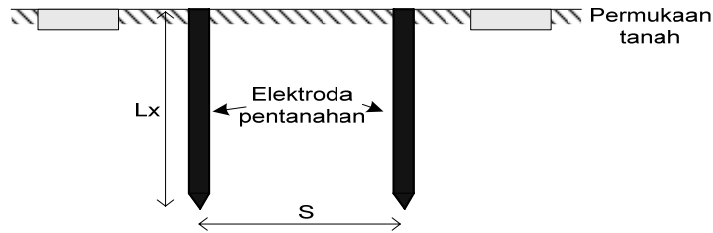
L = panjang batang yang tertanam [m]

$d =$ diameter elektroda batang [m]



Gambar 132
Elektroda Batang dan Lapisan-lapisan Tanah di Sekeliling Elektroda

Setelah didapatkan nilai tahanan pentanahan dengan satu buah elektroda batang, dimana belum didapatkan nilai tahanan yang diinginkan, maka tahanan pentanahan dapat diperkecil dengan memperbanyak elektroda yang ditanahkan dan dihubungkan paralel.



Gambar 133.
Pentanahan dengan Dua Batang Konduktor (Hubungan Paralel)

Disini kedua batang konduktor tersebut dihubungkan diatas tanah. Besar tahanan pentanahan adalah sebagai berikut :

Untuk $s \gg Lx$

$$R_p = \frac{\rho}{4\pi Lx} \left[Ln \frac{4Lx}{a} - 1 \right] + \frac{\rho}{4\pi s} \left[1 - \frac{Lx^2}{3s^8} + \frac{2Lx^4}{5s^4} \right] \dots\dots\dots (6)$$

Untuk $s \ll Lx$

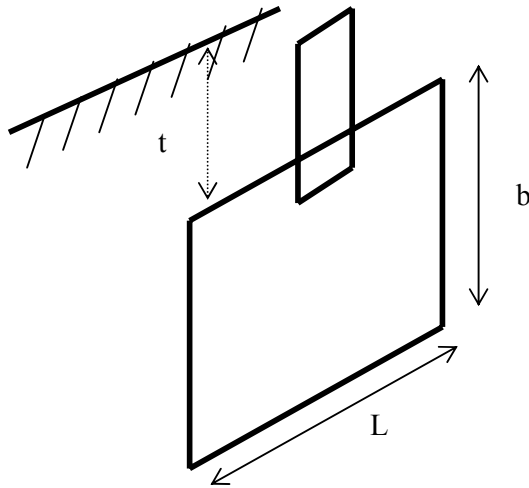
$$R_p = \frac{\rho}{4\pi Lx} \left[\ln \frac{4Lx}{a} + \ln \frac{4Lx}{s} - 2 + \frac{s}{2Lx} - \frac{s^2}{16Lx^2} + \frac{s^4}{512Lx^4} \right] \dots\dots\dots (7)$$

Dimana:

$s =$ Jarak antara kedua konduktor (m)

2. Elektroda Bentuk Plat

Elektroda plat adalah elektroda dari plat logam. Pada pemasangannya elektroda ini dapat ditanam tegak lurus atau mendatar tergantung dari tujuan penggunaannya. Bila digunakan sebagai elektroda pembumian pengaman maka cara pemasangannya adalah tegak lurus dengan kedalaman kira-kira 1 meter di bawah permukaan tanah dihitung dari sisi plat sebelah atas. Bila digunakan sebagai elektroda pengatur yaitu mengatur kecuraman gradien tegangan guna menghindari tegangan langkah yang besar dan berbahaya, maka elektroda plat tersebut ditanam mendatar.



Keterangan gambar:

L = panjang plat

t = kedalaman tertanam

b = lebar plat

Gambar 134.
Elektroda Plat Dipasang Vertikal

Untuk menghitung besar tahanan pembumian elektroda plat dipergunakan rumus sebagai berikut :

$$R_{pl} = \frac{\rho}{4,1L} \left(1 + 1,84 \frac{b}{t} \right) \dots\dots\dots (8)$$

dimana

R_{pl} = tahanan pembumian elektroda plat [Ω]

ρ = tahanan jenis tanah [$\Omega.m$]

L = panjang elektroda plat [m]

b = lebar plat [m]

t = kedalaman plat tertanam dari permukaan tanah [m]

3. Elektroda Bentuk Pita.

Elektroda ini merupakan logam yang mempunyai penampang yang berbentuk pita atau dapat juga berbentuk bulat, pita yang dipilin atau dapat juga berbentuk kawat yang dipilin. Elektroda ini dapat ditanam secara dangkal pada kedalaman antara 0,5 sampai 1 meter dari permukaan tanah, tergantung dari kondisi dan jenis tanah. Dalam pemasangannya elektroda pita ini dapat ditanam dalam bentuk memanjang, radial, melingkar atau kombinasi dari lingkaran dan radial.

Besar tahanan pembumian untuk elektroda pita dapat dihitung dengan rumus :

$$R_{pt} = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{d} \right) \dots\dots\dots (9)$$

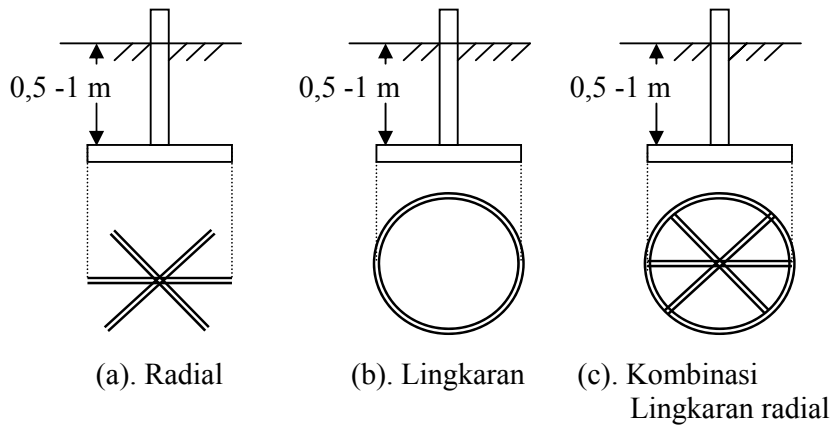
dimana :

R_{pt} = tahanan pembumian elektroda pita [Ω]

ρ = tahanan jenis tanah [Ωm]

L = panjang elektroda pita yang tertanam [m]

d = lebar pita/diameter elektroda pita kalau bulat [m]



Gambar 135
Jenis-jenis Elektroda Pita dan Cara Pemasangannya

4. Elektroda lain

Bila persyaratan dipenuhi jaringan air minum dari logam dan selubung logam kabel yang tidak diisolasi yang langsung ditanamkan kedalam tanah. Besi tulang beton atau kontruksi baja bawah tanah lainnya boleh dipakai untuk elektroda.

F. 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 magnitudo arus gangguan dalam waktu yang lama.
- Tahan terhadap korosi.

Dari persamaan kapasitas arus untuk elektroda tembaga yang dianjurkan oleh IEEE Guide standar, menemukan suatu persamaan :

$$A = I \sqrt{\frac{33t}{\log_{10} \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}}$$

dimana :

- A : penampang konduktor (circular mills)
 I : arus gangguan (Ampere)
 t : lama gangguan (detik)
 T_m : suhu maksimum konduktor yang diizinkan ($^{\circ}C$)
 T_a : suhu sekeliling tahunan maksimum ($^{\circ}C$)

Persamaan di atas dapat digunakan untuk menentukan ukuran penampang minimum dari konduktor tembaga yang dipakai sebagai kisi-kisi pentanahan.

G. Sistem Pentanahan Pada Jaringan Distribusi

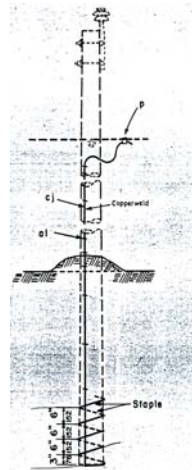
Sistem JTM 20 kV sampai dengan 29 kV harus selalu diketanahkan karena kemungkinan gagal sangat besar oleh tegangan lebih transien yang dikaitkan oleh busur tanah (arcing grounds). Dibawah ini ditunjukkan konstruksi pentanahan langsung dan pentanahan peralatan jaringan.

Pentanahan ini tidak membatasi arus gangguan tanah, oleh karena itu diperlukan suatu pengaman yang cepat.

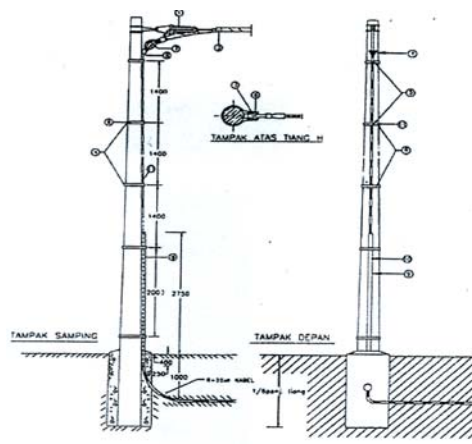
Tindakan pengamanan harus dilakukan sebaik-baiknya agar tegangan sentuh yang terlalu tinggi akibat dari kegagalan isolasi tidak terjadi dan membahayakan manusia serta peralatan itu sendiri.

Pada pentanahan peralatan tegangan sentuh yang sering adalah tegangan sentuh tidak langsung sebagaimana dijelaskan dalam PUIL 2000 (3.5.1.1) bahwa tegangan sentuh tidak langsung adalah tegangan sentuh pada bagian

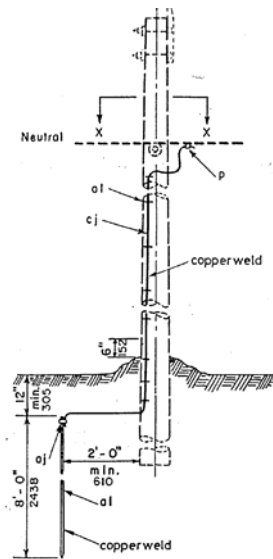
konduktor terbuka (BKT) perlengkapan atau instalasi listrik yang menjadi bertegangan akibat kegagalan isolasi.



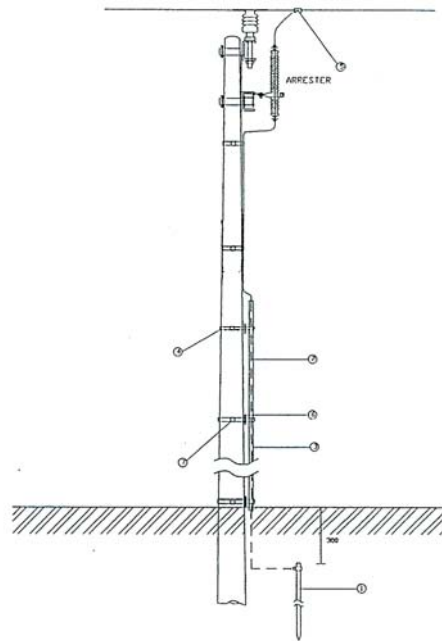
Gambar 136.
Pentanahan Netral Pada Tiang Lurus (Tangent)



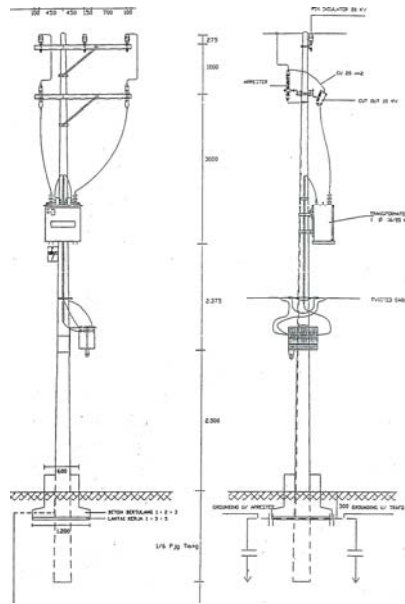
Gambar 137.
Pentanahan Netral Pada Tiang Akhir (Deadend)



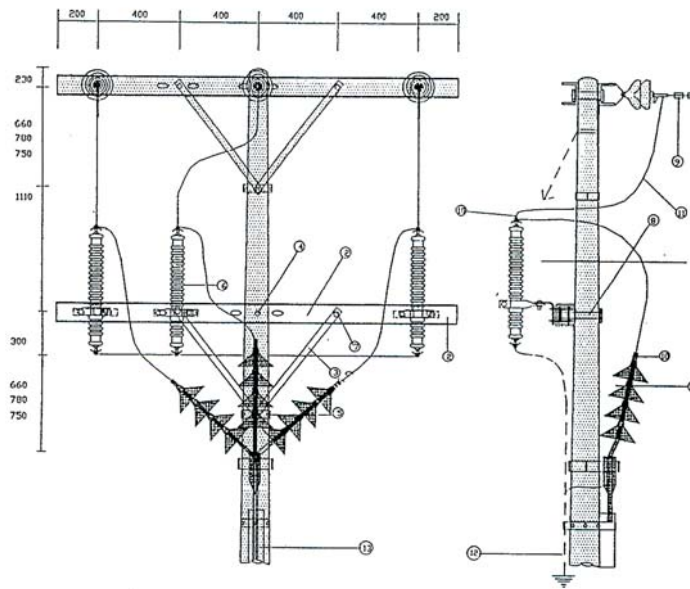
Gambar 138.
Sistem pentanahan netral lagsung



Gambar 139.
Pentanahan Arrester Pada Tiang Lurus (Tangent)



Gambar 142. Pentanahan Capacitor Bank Pada Tiang Lurus (Tangent)



Gambar 145. Sistem Pentanahan Pada Konstruksi Opstijg Cable

