

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 TINJAUAN PUSTAKA

“Analisa Perbaikan Tahanan Pentanahan Lightning Arrester di Jaringan dan Transformator Distribusi 20KV DI PT PLN (PERSERO) UP3 LUBUK PAKAM”[4]. Pada penelitian ini membahas gangguan eksternal trafo kontak paling banyak (29%) terjadi di daerah kerja PT PLN (Persero) Area Lubuk Pakam adalah sambaran petir.

“Penggunaan Campuran Magnesium Sulfat dan Arang Tempurung Kelapa Sebagai Upaya Perbaikan Resistansi Pentanahan Elektroda Jenis Batang”[5]. Pada penelitian ini membahas nilai yang didapat pada pipa besi galvanis lebih kecil dari pada tembaga, dengan begitu di tambahkannya campuran magnesium sulfat dan arang tempurung sebagai penurun nilai tahanan.

“Analisa Resistansi Pentanahan Sebagai Upaya Untuk Antisipasi Sambaran Petir di Daerah Perbukitan Wilayah Bantul”[6]. Pada penelitian ini membahas pada tanah regosol mempunyai nilai resistansi rata-rata $22,05\Omega$, latosol $17,04\Omega$, mediteran merah $15,12\Omega$. Jenis tanah grumusol mempunyai nilai resistansi tanah $7,8\Omega$ dan setelah dianalisis dengan pembumian 4 batang elektroda menurun menjadi $4,22\Omega$, karena tanah grumusol berstruktur lempung dan tanah lainnya berstruktur pasir.

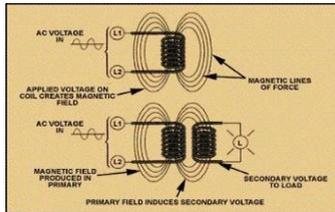
“Studi Kasus Pentanahan Transformator Distribusi 20KV di PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Binjai Timur”[1]. Pada penelitian ini membahas Perbaikan nilai resistansi pembumian bertujuan mengamankan komponen-komponen instalasi dari bahaya tegangan atau arus abnormal dimana menghubungkan sistem, badan peralatan, dan instalasi dengan bumi.

“Analisa Pengaruh Elektroda Hubung Paralel Dengan Media Arang Terhadap Nilai Tahanan Pentanahan”[7]. Pada penelitian ini membahas agar tidak merugikan atau merusak peralatan, hanya dengan disalurkan segera ke bumi terjadi penurunan nilai tahanan pentanahan yang awalnya menggunakan sistem pentanahan elektroda tunggal menjadi sistem pentanahan elektroda hubung paralel (titik AB) sebesar 52.307 % dan sistem pentanahan elektroda hubung paralel dengan media arang campur tanah (titik CD) sebesar 60 %

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Transformator Distribusi

Trafo merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama [8].



Gambar 2. 1 Rangkaian Trafo [9]

Transformator distribusi digunakan untuk membagi/menyalurkan arus atau energi listrik dengan tegangan distribusi supaya jumlah energi yang tercecer dan hilang pada saluran tidak terlalu banyak. Untuk mengurangi panas akibat pembebanan pada transformator, maka diperlukan pendinginan. Menurut jenis pendinginannya, transformator distribusi dibedakan menjadi 3 macam, yaitu :

1. Transformator konvensional
2. Transformator lengkap dengan pengaman sendiri
3. Transformator lengkap dengan pengaman pada sisi sekunder

Transformator konvensional, peralatan sistem pengamanannya terdapat diluar transformator, sedangkan transformator dengan pengaman sendiri terdapat di dalam transformator itu sehingga dikenal juga dengan Transformator Berpengaman Sendiri (BPS).

Untuk maksud penyesuaian dengan tegangan beban, pada belitan sisi tegangan tinggi sering diberi sadapan (tapping), sehingga dapat dipilih sampai 5 % diatas atau 10 % dibawah tegangan nominalnya. Macam-macam trafo transformator distribusi yaitu : trafo tiga fasa dan trafo satu fasa[9]

2.2.2 Rugi rugi daya dalam saluran distribusi

Pada sistem tenaga listrik terdapat perbedaan antara daya atau kekuatan (*power*) dan energi; energi adalah daya dikalikan waktu sedangkan daya listrik merupakan hasil perkalian tegangan dan arusnya, dengan satuan daya listrik yaitu watt yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu [Joule/s]. Daya listrik [P] yang dihasilkan oleh arus listrik [i] pada tegangan [v] dinyatakan dengan persamaan[5].

$$P = I^2 \cdot R \quad (1)$$

Keterangan :

P = Daya (watt)

I² = Arus (I)

R = Resistansi Saluran (Ω)

Impedansi rugi-rugi daya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$R = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2)$$

Keterangan :

Z = Impedansi (Ω)

R = Resistansi (Ω)

X = Reaktansi (Ω)

$$Z = R + Jx \quad (3)$$

Kereangan

Z = Impedansi (Ω)

R = Resistansi (Ω)

Jx = Angka imajiner

$$P = S \times \cos \Phi \times 24 \text{ jam} \quad (4)$$

Keterangan :

P = Daya (wat)

S = Daya Semu (watt)

24 Jam = jumlah perhari (S)

Cos Φ = Faktor Daya (watt)

Losses akibat adanya arus netral pada penghantar netral transformator. Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan losses (rugi-rugi). Losses pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (5)$$

Keterangan

P_N = losses pada penghantar netral trafo (watt)

I_N = arus yang mengalir pada netral trafo (A)

R_N = tahanan penghantar netral trafo (Ω)

Sedangkan losses yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (ground) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (6)$$

Keterangan:

P_G = losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G = arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G = tahanan pembumian netral trafo (Ω)

Arus gangguan hubung singkat [11]:

$$Z_t = \frac{KV^2}{MVA} \quad (7)$$

Keterangan:

Z_t = Impedansi Trafo(Ω)

KV^2 *sisi sekunder* = Tegangan sisi sekunder (KV)

MVA_{trafo} = Kapasitas Daya Trafo (KVA)

2.2.3 Sistem Pentanahan

Sistem Pentanahan sudah mulai dikenal sejak tahun 1900. Sebelumnya sistem-sistem tenaga listrik tidak diketanahkan karena ukurannya masih kecil dan tidak terlalu membahayakan. Sistem pentanahan adalah sistem hubungan penghantar yang menghubungkan sistem, badan peralatan, dan instalasi dengan bumi atau tanah sehingga dapat mengamankan manusia dari sengatan listrik dan mengamankan komponen-komponen instalasi dari bahaya tegangan atau arus abnormal[12].

Sedangkan pada sistem pentanahan peralatan adalah pentanahan yang menghubungkan body atau kerangka bagian dari peralatan listrik terhadap titik grounding (tanah), dimana pentanahan

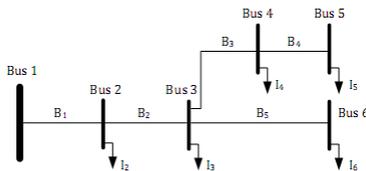
ini pada kerja normal tidak dilalui arus. Sistem pentanahan atau pembumian peralatan ini juga tidak jauh beda dengan sistem pentanahan titik netral dimana keduanya sama-sama membuang arus atau tegangan lebih ke bumi melalui elektroda pentanahan [13]

Rumus yang digunakan untuk mengetahui tahanan pentanahan yaitu:

$$R = \frac{E_f}{I} \quad (8)$$

Keterangan

R = Tahanan (Ohm)
 Ef = Tegangan fasa ke netral (V)
 I = Arus beban penuh dari transformator (Ampere)



Gambar 2. 2 Sistem Pentanahan [5]

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

mengungkapkan tujuan dari sistem pentanahan adalah:

- 1) Menjamin keselamatan orang dari sengatan listrik baik dalam keadaan normal atau tidak dari tegangan sentuh dan tegangan langkah.
- 2) Menjamin kerja peralatan listrik atau elektronik.
- 3) Mencegah kerusakan peralatan listrik atau elektronik.
- 4) Menyalurkan energi serangan petir ke tanah.

- 5) Menstabilkan tegangan dan memperkecil kemungkinan terjadinya flashover ketika terjadi transient.
- 6) Mengalihkan tegangan umpan balik (Reverse Forward) liar dari peralatan-peralatan seperti: audio, video, kontrol dan komputer.

Sedangkan menurut [14], tujuan sistem pentanahan adalah:

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

Tujuan dari Pembumian adalah sebagai pengaman dari kejut listrik yang disebabkan oleh tegangan sentuh dan kerusakan alat yang disebabkan karena rusaknya isolasi. Tegangan sentuh dapat terjadi karena kebocoran/kegagalan isolasi pada perlengkapan listrik seperti motor listrik, seterika listrik, kotak hubung bagi dsb. Besar tegangan sentuh yang membahayakan manusia adalah 50 V keatas (untuk tempat kering) atau 25 V keatas (untuk tempat lembab).[15]

Terdapat dua jenis pembumian pada sistem tenaga listrik [16] yaitu:

- 1) **Pembumian Sistem**
Pembumian sistem adalah pembumian pada sistem tenaga listrik ke bumi dengan cara tertentu. Pembumian sistem ini dilakukan pada transformator pada Gardu Induk (GI) dan transformator pada Gardu Distribusi (GD) di saluran distribusi. Umumnya pembumian sistem dilakukan pada titik netral sistem tenaga. Tujuan dari pembumian sistem adalah:
 - a) Mengurangi tegangan lebih transient yang tinggi yang disebabkan oleh arus gangguan relatif besar (<5A).
 - b) Membatasi tegangan-tegangan pada fase-fase yang tidak terganggu

2) Penumbumian peralatan

penumbumian peralatan adalah penbumia bagian konduktif terbuka (BKT) peralatan yang pada waktu normal tidak bertegangan. Secara umum tujuan penbumian peralatan adalah:

- a) membatasi tegangan antara bagian-bagian yang tidak dilalui arus dengan tanah sampai pada suatu harga yang aman
- b) memperoleh impedansi yang rendah atau kecil dari jalan balik arus hubung singkat ke tanah

Agar sistem penbumian 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. Tujuan penbumian pada suatu sistem tenaga listrik secara umum adalah:
 1. Memberikan perlindungan terhadap bahaya listrik bagi pemanfaat listrik dan lingkungannya.
 2. Mendapatkan keandalan penyaluran pada sistem baik dari segi kualitas, keandalan ataupun kontinuitas penyaluran tenaga listrik.
 3. Membatasi kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terhubung tanah dan nilai tegangan kerja minimal.

Pada jaringan distribusi tenaga listrik terdapat sejumlah titik pembumian baik pada sisi tegangan menengah maupun pada sisi Tegangan Rendah yaitu:

1. Pembumian pada konstruksi jaringan distribusi ialah sebagai berikut:
 - a. Pembumian titik netral transformator Gardu Induk.
 - b. Pembumian titik netral transformator sisi tegangan rendah (sekunder) pada gardu distribusi.
 - c. Pembumian penghantar netral sisi tegangan menengah dan tegangan rendah.
 - d. Pembumian penghantar tanah (shield wire) sisi Tegangan Rendah.
 - e. Pembumian pelindung lapisan tembaga, baja pada kabel bawah tanah.
2. Pembumian alat proteksi dan alat ukur sebagai berikut:
 - a. Pembumian Lightning Arrester.
 - b. Pembumian CT/PT.
 - c. Pembumian Bagian Konduktif Terbuka (BKT) sebagai berikut:
 - d. Pembumian badan (panel) PHB-TM, PHB-TR, Kabel Tray/Rak Kabel.
 - e. Pembumian Palang (cross arm/travers).
 - f. Pembumian bagian logam yang bukan merupakan bagian dari instalasi, misalnya pintu gardu, pagar besi

Untuk mencegah terjadinya tegangan sentuh yang berbahaya (diatas 50V), kerangka logam dari peralatan listrik harus dihubungkan ke tanah melalui impedansi rendah. Impedansi pembumian ini harus sangat kecil sehingga tegangan sentuh yang timbul pada kerangka logam peralatan harus cukup kecil dan tidak berbahaya.

[17] Tabel 2. 1 Besar dan Lama Tegangan Sentuh

Besar tegangan sentuh (v)		Lama sentuhan maksimum (Detik)
AC	DC	
<50	<120	-
50	120	5,0
75	140	1,0
90	160	0,5
110	175	0,2
150	200	0,1
220	250	0,05
280	310	0,01

International Electrotechnical Commission (IEC) merekomendasikan tegangan sentuh yang diizinkan sebagai fungsi dari lama gangguan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1. umumnya digunakan untuk sistem tegangan pentanahan. Untuk dapat memenuhi syarat tersebut maka tahanan pentanahan sebesar:

$$R_B < \frac{50}{kI_n} \Omega \quad (9)$$

Keterangan:

RB = Resistansi grounding (Ohm)

In = Arus nominal alat pengaman arus lebih (A)

K = Bilangan bergantung pada karakteristik alat pengaman
 = 2,5 – 5 untuk pengaman lebur (sekering)
 = 1,25 – 3,5 untuk pengaman jenis lainnya

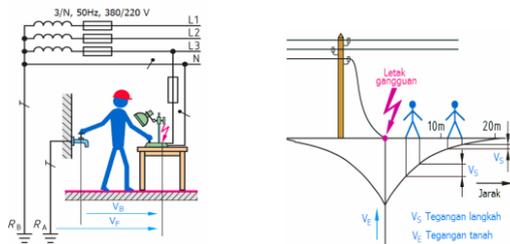
Terdapat juga tegangan langkah. Tegangan langkah adalah tegangan yang timbul diantara kedua kaki orang yang sedang berdiri diatas tanah switchyard gardu induk yang sedang dialiri arus gangguan hubung singkat ke tanah. Dalam tegangan langkah ini di asumsikan jarak antara kedua kaki manusia yaitu 1 meter dan diameter kaki 8 cm[18].

Dengan ini dapat dinyatakan pentanahan peralatan ini dimaksudkan untuk:

- a) Mengamankan manusia dari sengatan listrik baik tegangan sentuh maupun tegangan langkah
- b) Dapat mencegah terjadinya busur api akibat gangguan tanah

Tabel 2. 2 Besar dan Lama Tegangan Langkah yang Dizinkan [18]

Lama gangguan (Detik)	Tegangan langkah yang diizinkan (Volt)
0,1	7.000
0,2	4.950
0,3	4.040
0,4	3.500
0,5	3.140
1,0	2.216
2,0	1.560
3,0	1.280



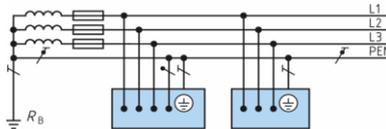
Gambar 2. 3 Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah [12]

2.2.4 Sistem Pembumian Netral

Sistem pembumian pada titik netral dari sistem tenaga merupakan suatu keharusan, karena sistem ini sudah besar dengan jangkauan yang luas dan tegangan yang tinggi. Pembumian titik netral ini pasang pada transformator daya pada gardu distribusi dan perlatan listrik pada panel di intalasi. Menurut [12] jenis-jenis skema pembumian (*Grounding*) netral akan menentukan skema proteksinya, berikut jenis-jenis sistem pembumian netral:

- 1) TN-C (*Terre Neutral – Combined*) Sistem: Saluran tanah dan netral di satukan

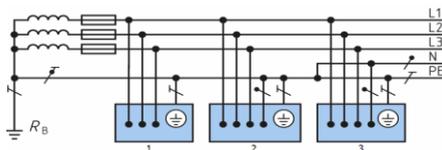
Pada sistem ini saluran netral dan saluran pengaman disatukan pada sistem secara keseluruhan. Semua bagian sistem mempunyai saluran PEN yang merupakan kombinasi antara saluran N dan PE. Disini seluruh bagian sistem mempunyai saluran PEN yang sama.



Gambar 2. 4 Sistem: TN-C (Terre Neutral – Combined) [12]

- 2) TN-C-S (*Terre Neutral – Combined – Separated*) Sistem: Saluran tanah dan netral di satukan dan dipisah

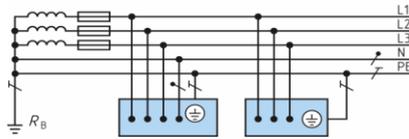
Pada sistem ini saluran netral dan saluran pengaman dijadikan menjadi satu saluran pada sebagian sistem dan terpisah pada sebagian sistem yang lain. Di sini terlihat bahwa bagian sistem 1 dan 2 mempunyai satu hantaran PEN (combined). Sedangkan pada bagian sistem 3 menggunakan dua hantaran, N dan PE secara terpisah (separated).



Gambar 2. 5 Sistem: TN-C-S (Terre Neutral – Combined – Separated) [12]

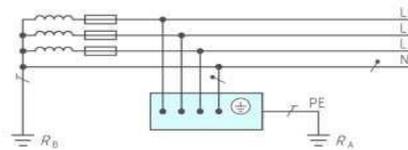
- 3) TN-S (*Terre Neutral – Separated*) Sistem: Saluran tanah dan netral di pisah

Pada sistem ini saluran netral dan saluran pengaman terdapat pada sistem secara keseluruhan. Jadi semua sistem mempunyai dua saluran N dan PE secara tersendiri (separated).



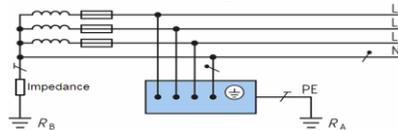
Gambar 2. 6 . Sistem TN-S (Terre Neutral – Separated) [12]

- 4) TT (*Terra-Terra*) Sistem: saluran (kabel) tanah dan tanah
 Pada sistem ini titik netralnya disambungkan langsung ke tanah, namun bagian-bagian instalasi yang konduktif disambungkan ke elektroda pembumian (Ground) yang berbeda (berdiri sendiri).



Gambar 2. 7 Sistem TT (Terra-terra) [12]

- 5) IT (*Isolated Terre*) Sistem: Saluran tanah melalui impedansi
 Sistem rangkaian tidak mempunyai hubungan langsung ke tanah namun melalui suatu impedansi, sedangkan bagian konduktif instalasi dihubungkan langsung ke elektroda pentanahan secara terpisah. Sistem ini juga disebut sistem pentanahan impedansi. Ada beberapa jenis sambungan titik netral secara tidak langsung ini, yaitu melalui reaktansi, tahanan dan kumparan petersen. Antara ketiga jenis media sambungan ini mempunyai kelebihan dan kekurangan. Namun, secara teknis jenis sambungan kumparan petersen yang mempunyai kinerja terbaik. Permasalahannya adalah harganya yang mahal



Gambar 2. 8 Sistem IT (Isolated Terre) [12]

2.2.5 Tahanan Pentanahan

Tahanan pentanahan harus sekecil mungkin untuk menghindari bahaya-bahaya yang ditimbulkan oleh adanya arus gangguan tanah. Hantaran netral harus diketanahkan di dekat sumber listrik atau transformator, pada saluran udara setiap 200 m dan di setiap konsumen. Tahanan pentanahan satu elektroda di dekat sumber listrik, transformator atau jaringan saluran udara dengan jarak 200 m maksimum adalah 10 Ohm dan tahanan pentanahan dalam suatu sistem tidak boleh lebih dari 5Ω . [12]

Dengan ini bahwa tahanan pentanahan diharapkan bisa sekecil mungkin, namun dalam prakteknya tidaklah selalu mudah untuk mendapatkan nilai resistansi kecil karena banyak faktor yang mempengaruhi tahanan pentanahan. Dan adapun faktor-faktor yang mempengaruhi adalah:

- a) Bentuk elektroda, seperti: jenis batang, pita dan pelat.
- b) Jenis bahan dan ukuran elektroda: Sebagai konsekwensi peletakannya di dalam tanah, maka elektroda dipilih dari bahan-bahan tertentu yang memiliki konduktivitas sangat baik dan tahan terhadap sifat-sifat yang merusak dari tanah, seperti korosi. Ukuran elektroda dipilih yang mempunyai kontak paling efektif dengan tanah.
- c) Jumlah/konfigurasi elektroda: Untuk mendapatkan tahanan pentanahan yang dikehendaki dan bila tidak cukup dengan satu elektroda, bisa digunakan lebih banyak elektroda dengan bermacam-macam konfigurasi pemancangannya.
- d) Kedalaman pemancangan/penanaman di dalam tanah: Pemancangan ini tergantung dari jenis dan sifat-sifat tanah. Ada yang lebih efektif ditanam secara dalam, namun ada pula yang cukup ditanam secara dangkal;
- e) Faktor-faktor alam. Jenis tanah: tanah gembur, berpasir, berbatu, dan lain- lain; moisture tanah: semakin tinggi kelembaban atau kandungan air dalam tanah akan memperrendah tahanan jenis tanah; kandungan mineral tanah: air tanpa kandungan garam adalah isolator yang baik dan semakin tinggi kandungan garam akan memperrendah tahanan jenis tanah, namun meningkatkan korosi; dan suhu tanah: suhu akan berpengaruh bila mencapai suhu beku dan

di bawahnya. Untuk wilayah tropis seperti Indonesia tidak ada masalah dengan suhu karena suhu tanah ada di atas titik beku.

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. Berdasarkan persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 [3] mengenai tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah dapat dilihat pada tabel 2.3:

Tabel 2. 3 Tahanan Jenis Tanah [3]

No.	Jenis tanah	Tahanan jenis tanah Ω
1	Tanah rawa	10 – 40
2	Tanah liat dan tanah lading	20 – 100
3	Pasir basah	50 – 200
4	Krikil basah	200 – 3000
5	Tanah berbatu	2000 – 3000
6	Pasir dan krikil	< 10000
7	Air laut dan air tawar	10 - 100

$$\rho = \frac{2 \times \pi \times L \times R1}{\left(\ln \frac{4 \times L}{d} - 1\right)} \quad (10)$$

Dimana:

- ρ = Resistansi jenis tanah (Ohm-meter)
- L = Panjang elektroda (m)
- d = Jari-jari elektroda (m)
- R = Nilai tahanan

2.2.6 Elektroda Pentanahan

Elektroda pentanahan adalah penghantar yang ditanam dalam tanah dan membuat kontak langsung dengan tanah. dengan demikian kontak langsung tersebut bertujuan agar dapat menyalurkan arus sebaik mungkin apabila terjadinya gangguan.[3]

Untuk bahan elektroda yang sering digunakan adalah tembaga atau baja yang bergalvanis atau dilapisi tembaga sepanjang kondisi tempat yang tidak mengharuskan memakai bahan lain. Ukuran standar minimum elektroda bumi dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Indonesia mempunyai beberapa jenis elektroda pentanahan yang sering digunakan dalam sistem pentanahan, tujuan dari adanya peraturan mengenai jenis elektroda ini adalah untuk membatasi banyaknya jenis, dimensi dan mutu elektroda pentanahan serta memberikan pegangan yang terarah bagi pemesan, pembuat, maupun penguji pentanahan nantinya [1], di antaranya:

a. Elektroda Pelat

Elektroda pelat adalah elektroda yang terbuat dari bahan pelat logam (utuh atau berlubang) atau juga bisa dari kawat kasa. Elektroda pelat ditanam tegak lurus di dalam tanah dan umumnya cukup dengan plat ukuran 4m x 0,5m. Cara untuk memperoleh resistansi pentanahan yang lebih rendah, maka beberapa pelat dapat digunakan secara bersama dengan rangkaian paralel[3]. Elektroda pelat adalah elektroda dari bahan pelat logam atau dari kawat kasa yang umumnya elektroda ini ditanam dalam. Elektroda ini digunakan apabila diinginkan resistansi pentanahan yang kecil dan sulit diperoleh dengan menggunakan jenis-jenis elektroda yang lain[12].

Tabel 2. 4 Luas Penampang Minimum Elektroda Bumi [3]

No	Bahan Jenis Elektroda	Baja Digalvanisasi Dengan Proses Pemanasan	Baja Berlapis Tembaga	Tembaga
1	Elektroda Pita	Pipa baja 100 mm ² setebal minimal 3mm	50mm ²	Pita tembaga 50 mm ² tebal minimal 2 mm
		Penghantar pilin 95 mm ² (Bukan kawat halus)		Penghantar pilin 35 mm ² (bukan kawat halus)
2	Elektroda Batang	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Pipa baja 25mm² ▣ Baja profil (mm) Lebar 65 x 65 x7 U 6,5 T 6 x 50 x 3 ▣ Batang profil lain yang setaraf 	Baja berdiameter 15 mm dilapisi tembaga setebal 250 μm	
3	Elektroda Pelat	Pelat besi tebal 3 mm, luas 0,5-1m ²		Pelat tembaga tebal 2mm, luas 0,5 – 1 m ²

Tabel 2.1 Rumus-Rumus Pendekatan Untuk Menghitung Tahanan Tanah[1]

	Satu batang tanah, Panjang L , radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
	Dua batang tanah $s > L$; jarak s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \right)$
	Dua batang tanah $s < L$; jarak s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^2} \right)$
	Kawat horizontal, panjang $2L$, dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^2} \right)$
	Kawat siku-siku, panjang lengan L , dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0,2373 + 0,2146 \frac{s}{L} + 0,1035 \frac{s^2}{L^2} - 0,0424 \frac{s^4}{L^4} \right)$
	Tiga titik bintang, panjang lengan L , dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1,071 - 0,209 \frac{s}{L} + 0,238 \frac{s^2}{L^2} - 0,054 \frac{s^4}{L^4} \right)$
	Empat titik bintang, panjang lengan L , dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2,912 - 1,071 \frac{s}{L} + 0,645 \frac{s^2}{L^2} - 0,145 \frac{s^4}{L^4} \right)$
	Enam titik bintang, panjang lengan L , dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 6,851 - 3,128 \frac{s}{L} + 1,758 \frac{s^2}{L^2} - 0,490 \frac{s^4}{L^4} \right)$
	Delapan titik bintang, panjang lengan L , dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10,98 - 5,51 \frac{s}{L} + 3,26 \frac{s^2}{L^2} - 1,17 \frac{s^4}{L^4} \right)$
	Cincin kawat, diam, cincin D , dalam kawat d , dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
	Pelat horisontal, panjang $2L$, $a \times b$ dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right)$
	Pelat bundar horisontal, radius a , dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \right)$
	Pelat bundar vertikal, radius a , dalam $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 + \frac{7a^2}{24s^2} + \frac{99a^4}{320s^4} \right)$



Gambar 2. 9 Elektroda Plat [12]

Rumus perhitungan resistansi pentanahan elektroda pelat tunggal [12]:

$$R_G = R_P = \frac{\rho}{2\pi l_P} \left[\ln \left(\frac{8W_P}{0,5W_P + T_P} \right) - 1 \right] \quad (11)$$

Keterangan:

- R_p = Resistansi pentanahan (Ohm)
- ρ = Resistansi jenis tanah (Ohm-meter)
- L_p = Panjang pelat (m)
- W_p = Lebar pelat (m)
- T_p = Tebal pelat (m)

b. Elektroda Batang

Elektroda batang adalah elektroda dari besi atau baja profil yang dipasang tegak lurus ke dalam tanah. Umumnya digunakan batang tembaga dengan diameter 5/8 inc sampai 3/4 inc, panjang 4 m, atau bisa juga pipa galvanis dengan diameter 1 inc sampai 2 inc, panjang 6 m [3], sedangkan menurut [12], elektroda batang adalah elektroda dari pipa atau besi baja profil yang dipancangkan ke dalam tanah. Elektroda ini merupakan elektroda yang pertama kali digunakan dan teori-teori berawal dari elektroda jenis ini. Elektroda ini banyak digunakan di gardu induk-gardu induk. Secara teknis elektroda batang ini mudah sekali pemasangannya, yaitu tinggal memancangkan ke dalam tanah, selain itu, elektroda ini tidak memerlukan lahan yang luas.

Elektroda batang harus dipasang secara tegak lurus ke dalam tanah, dengan bagian batang atas terletak 30 cm di bawah permukaan tanah. Panjang elektroda harus disesuaikan dengan resistansi pentanahan yang diperlukan, untuk memperoleh nilai resistansi pentanahan yang kecil, maka diperlukan beberapa elektroda batang yang pemasangan jarak antar elektroda tersebut minimum harus dua kali panjangnya.



Gambar 2. 10 Elektroda Batang [12]

Rumus resistansi pentanahan elektroda Batang-Tunggal [12]:

$$R_G = R_R = \frac{\rho}{2\pi L_R} \left[\ln \left(\frac{4L_R}{A_R} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

Keterangan:

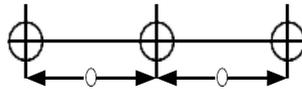
- R_G = Resistansi pentanahan (Ohm)
- R_R = Resistansi pentanahan untuk batang tunggal (Ohm)
- ρ = Resistansi jenis tanah (Ohm-meter)
- L_R = Panjang elektroda (m)
- A_R = Diameter elektroda (m)

Setelah didapatkan nilai tahanan pentanahan dengan satu buah elektroda batang, dimana belum didapatkan nilai tahanan yang diinginkan, maka tahanan pembumian dapat diperkecil dengan memperbanyak elektroda yang ditanahkan dan dihubungkan paralel. Perhitungan tahanan pembumian elektroda batang lebih dari satu bila tahanan pembumian yang dikehendaki tidak dapat dicapai oleh elektroda tunggal (single rod) maka dua elektroda atau lebih dapat dipergunakan. Beberapa konfigurasi pemasangan elektroda batang lebih dari satu sebagai berikut :

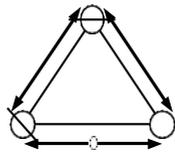
1. Konfigurasi *double straight*



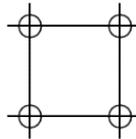
2. Konfigurasi *triple straight*



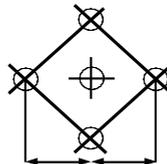
3. Konfigurasi *Triangle*



4. Konfigurasi *Square*



5. Konfigurasi *crosscycle*



Untuk menghitung tahanan pembumian total (R_{pt}) konfigurasi diatas, maka dipakai rumus:

$$R_{pt} = \frac{\rho \times k}{2 \times \pi \times L} \times fp \quad \text{Konfiurasi } \Omega \quad (13)$$

k = faktor pengali elektroda tunggal

Faktor pengali elektroda batang tunggal (k) :

$\frac{\rho}{R}$	20	200	2.000	20.000
K	3	5,3	7,6	9,9

Untuk faktor pengali konfigurasi elektroda batang double straight menggunakan rumus:

$$\frac{1+m}{2} \quad (14)$$

Untuk *triple straight* menggunakan rumus:

$$\frac{1-2m^2+2}{3-4m+n} \quad (15)$$

Untuk *triagle* menggunakan rumus:

$$\frac{1+2m}{3} \quad (16)$$

Untuk *squre* menggunakan rumus:

$$\frac{1+2m+q}{4} \quad (17)$$

Untuk *cross circle* menggunakan rumus:

$$\frac{1+2q+n-4m^2}{5+2q+n-8m} \quad (18)$$

dimana:

$$k = \ln \frac{l}{r} \quad (19)$$

$$m = \frac{\ln x}{k} \quad (20)$$

$$x = \frac{1+l}{l} \quad (21)$$

$$y = \frac{l+2l}{l} \quad (22)$$

$$q = \frac{\ln z}{\ln \frac{l}{r}} \quad (23)$$

$$z = \frac{l+2L}{2L} \quad (24)$$

Bila tahanan pembumian dikehendaki tidak dapat dicapai oleh satu elektroda batang, maka dua elektroda atau lebih dapat dipergunakan. Untuk jumlah elektroda yang sedikit cenderung mengikuti rumus tahanan hubungan paralel yaitu:

$$\frac{1}{R_1} = k \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_n} \right) \quad (25)$$

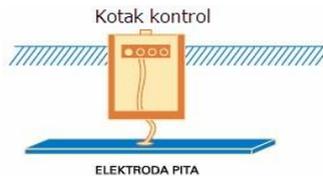
Tetapi didalam perktik menggunakan rumus:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_n} \quad (26)$$

Dimana k tergantung pada jumlah dan panjang elektroda, jarak antara elektroda dan variasi tahanan jenis tanah (ρ). Jika beberapa elektroda batang yang paralel tidak bekerja efektif pada seluruh batang (misal karena ada lapisan tanah yang kering) maka jarak minimum antara elektroda yang dipilih $2x$ panjang efektif dari 1 (satu) elektroda batang.

c. Elektroda Pita

Elektroda pita adalah elektroda yang terbuat dari hantaran yang berbentuk pita atau berpenampang bulat atau hantaran pilit. Pemasangan elektroda pentanahan mempunyai kombinasi bentuk antara lain memanjang dengan cara radial, melingkar atau kombinasi dari bentuk tersebut. Apabilakeadaan tanah mengizinkan, elektroda pita harus ditanam sedalam 0,5 sampai 1,0 m secara horisontal didalam tanah [3]. Menurut[12], elektroda pita ialah elektroda yang terbuat dari hantaran berbentuk pita atau berpenampang bulat atau hantaran pilin yang pada umumnya ditanam secara dangkal. Pemasangan ini akan bermasalah apabila mendapati lapisan-lapisan tanah yang berbatu, disamping sulit dalam pemasangannya, untuk mendapatkan nilai resistansi yang rendah juga akan bermasalah, sebagai pengganti untuk pemasangan secara vertikal ke dalam tanah dapat dilakukan dengan menanam batang hantaran secara mendatar (horisontal) dan dangkal. Resistansi pentanahan yang dihasilkan juga sangat dipengaruhi oleh bentuk konfigurasi elektrodanya, seperti dalam bentuk melingkar, radial atau kombinasi antar keduanya.



Gambar 2. 11 Elektroda Pita [12]

Rumus perhitungan resistansi pentanahan [12]:

$$R_G = R_w = \frac{\rho}{\pi l_w} \left[\ln \left(\frac{2L_w}{\sqrt{d_w Z_w}} \right) + \frac{1,4L_w}{\sqrt{A_w}} - 5,6 \right] \quad (27)$$

Keterangan:

- R_w = Resistansi dengan kisi-kisi grid kawat (Ohm)
- ρ = Resistansi jenis tanah (Ohm-meter)
- L_w = Panjang total grid kawat (m)
- d_w = Diameter kawat (m^2)
- Z_w = Kedalaman penanaman (m)
- A_w = Luasan yang dicakup oleh grid (m^2)

Syarat-syarat elektroda batang bulat sesuai dengan [19] adalah:

1. Syarat Bahan:
 - a. Batang baja elektroda: Batang baja elektroda harus terbuat dari baja karbon tinggi dengan tarik minimum 51 kg/mm², serta mempunyai kekerasan minimum 74 HrB.
 - b. Lapisan tembaga: Lapisan tembaga harus mempunyai kadar tembaga minimum 99,9 %.
 - c. Klem dan baut: Klem dan baut harus terbuat dari tembaga paduan dengan kadar tembaga minimum 60 %
2. Syarat Mutu:
 - a. Sifat tampak: Elektroda bumi harus mempunyai permukaan yang halus, rata, bersih, tidak berpori dan harus terlihat lurus, sedangkan pada klem, tidak boleh terlihat cacat yang dapat mengganggu fungsi.
 - b. Sifat mekanis: Elektroda harus mampu ditancapkan tegak lurus ke dalam tanah normal, tidak boleh retak, pecah atau bengkok.
 - c. Korosi: Batas maksimum laju korosi yang terjadi pada batang elektroda bumi ini sebesar 50 mg/dm²/hari.

- d. Sifat listrik: Nilai resistansi elektroda pentanahan maksimum yang boleh dicapai adalah 5×10^{-3} Ohm-meter pada suhu 270C.

2.2.7 Pengukuran Resistansi Pentanahan

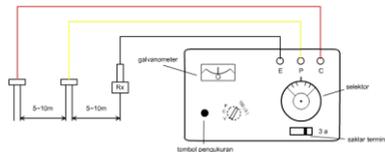
Saat ini telah ada alat ukur resistansi pembumian yang sering disebut *Earthtester* atau *Groundtaster*, mulai dari yang kompleks hingga dampai yang hanya untuk beberapa fungsi saja, penunjukan alat ukur ini ada yang analog dan digital dengan cara pengoprasian yang mudah.

Menurut [12] Ada berbagai macam instrument pengukur tanah pentanahan, salah satu contohnya adalah Earth Hi Tester. Pada instrument cara pengukuran ada 2 macam yaitu :

1. Pengukuran normal (metoda 3 kutub)

Langkah awal adalah memposisikan saklar terminal pada 3a, selanjutnya :

- a. Cek tegangan baterai ! (Range saklar : BATT, aktifkan saklar / ON). Jarum harus dalam range BATT.
- b. Cek tegangan pentanahan (Range saklar : ~ V, matikan saklar / OFF)
- c. Cek tanah pentanahan bantu (Range saklar : C & P, matikan saklar / (OFF). jarum harus dalam range P/C (lebih baik posisi jarum berada saklar(0).
- d. Ukurlah tahanan pentanahan (Range saklar : x1K ke x100K) dengan menekan tombol pengukuran dan memutar selektor, hingga diperoleh jarum pada galvanometer seimbang / menunjuk angka nol. hasil pengukuran adalah angkayang ditunjukkan pada selektor dikalikan dengan posisi range saklar (x1K) atau (x100K)



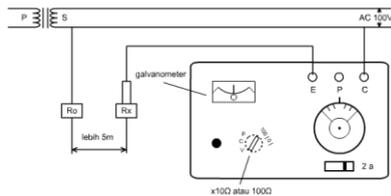
Gambar 2. 12 Pengukuran Metode 3 kutub [12]

2. Pengukuran praktis (metoda 2 kutub)

Langkah awal adalah memposisikan saklar terminal pada 2a. Perhatikan !

Jika jalur pentanahan digunakan sebagai titik referensi pengukuran bersama, maka semua sambungan yang terhubung dengan pentanahan itu selalu terhubung dengan tanah. Jika terjadi bunyi bip, maka putuskan dan cek lagi.

 - a. Cek tegangan baterai dan cek tegangan pentanahan, caranya hampir sama dengan metoda pengukuran normal, hanya pengecekan tekanan tahanan bantu tidak diperlukan.
 - b. Ukur tahanan pentanahan (Range saklar : x10K atau x100K). Hasil pengukuran = $R_x + R_o$



Gambar 2. 13 Pengukuran Metode 2 Kutub [12]

3. Cara menggunakan earth tester adalah sebagai berikut:
 - a. Periksa kondisi dan kelengkapan penunjang alat ukur earth tester digital. Gambar 16 menunjukkan 1 buah earth tester digital, 2 batang angkur dengan 3 kabel dengan warna merah, kuning dan hijau



Gambar 2. 14 Earth Tester Kiyoritsu [1]

- b. Periksa kawat grounding pada gardu yang akan diukur. Bila kotor, bersihkan terlebih dahulu permukaan kabel tersebut agar jepitan kabel probe dapat menyentuh langsung permukaan kawat yang sudah bersih untuk mencegah terjadinya kesalahan pembacaan pada alat ukur.
- c. Lakukan pengukuran dengan cara bentangkan kabel warna merah sepanjang 20 meter. Ujung kabel yang menggunakan sepatu kabel adalah untuk dijepit ke batang angkur, sedangkan ujung lainnya dihubungkan ke alat ukur pada terminal C, kemudian tancapkan batang angkur ke dalam tanah
- d. Bentangkan kabel warna kuning sepanjang 10 meter. Ujung kabel yang menggunakan sepatu kabel adalah untuk dijepit ke batang angkur, sedangkan ujung lainnya dihubungkan ke alat ukur pada terminal P, kemudian tancapkan batang angkur ke dalam tanah. Jarak angkur antara kabel warna merah dan kuning adalah 5 sampai 10 meter. Hubungkan jepitan kabel warna hijau ke kawat grounding yang akan diukur dan ujung lainnya dihubungkan ke terminal E pada alat ukur
- e. Untuk melakukan pengukuran tekan tombol orange lalu putar searah jarum jam. Putar rotary switch sesuai dengan angka pengukuran yang diinginkan.
- f. Lakukan pembacaan pada alat ukur

