

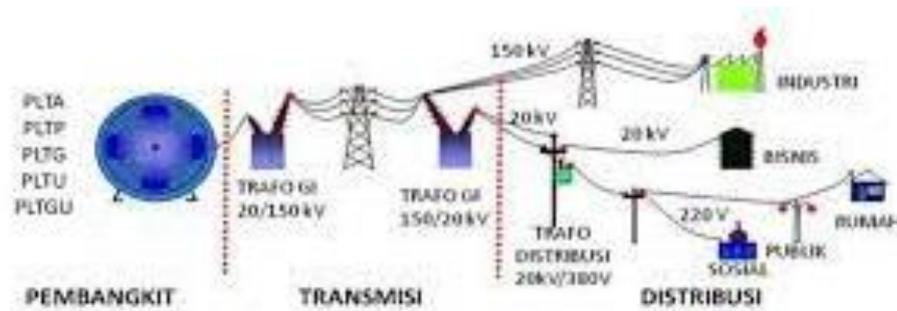
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Transmisi

Pembangunan pusat pembangkit dengan kapasitas produksi energi listrik yang besar, seperti PLTA, PLTU, PLTGU, PLTG, dan PLTP memerlukan banyak persyaratan, terutama masalah lokasi yang tidak selalu bisa dekat dengan pusat beban, seperti kota, kawasan industri, dan lainnya. Akibatnya, tenaga listrik tersebut harus disalurkan melalui sistem transmisi, yaitu :

- Saluran transmisi
- Gardu induk
- Saluran distribusi



Gambar 2.1 Sistem Transmisi

Apabila salah satu bagian dari sistem transmisi mengalami gangguan, maka akan berdampak terhadap bagian transmisi yang lainnya sehingga saluran transmisi, gardu induk, dan saluran distribusi merupakan satu kesatuan yang harus dikelola dengan baik.

2.2 Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)/Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)

Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) adalah sarana di udara untuk menyalurkan tenaga listrik berskala besar dari pembangkit ke pusat-pusat beban dengan menggunakan tegangan tinggi (TT) dan tegangan ekstra tinggi (TET). Namun, SUTT merupakan jenis saluran yang hanya digunakan di PT. PLN UPT Palembang, khususnya

ULTG Keramasan ini. Pembangunan SUTT sudah melalui proses rancang bangun yang aman bagi lingkungan, serta sesuai dengan standar keamanan internasional, di antaranya :

1. Ketinggian kawat penghantar
2. Penampang kawat penghantar
3. Daya isolasi
4. Medan listrik dan medan magnet
5. Desis *corona*

Macam saluran udara yang ada di sistem ketenagalistrikan ULTG Keramasan, antara lain :

- a. Saluran Udara Tegangan Tinggi 70 kV
- b. Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV

2.3 Definisi Tiang¹

Menurut SK DIR 0520 2014 (Surat Keputusan Direktur No. 0520 Tahun 2014), komponen utama dari fungsi struktur pada sistem transmisi SUTT/SUTET adalah tiang (*tower*). Tiang adalah konstruksi bangunan yang kokoh untuk menyangga/merentang konduktor penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya dengan sekat insulator.

2.3.1 Tiang/*Tower* Menurut Fungsi

1. Tiang penegang (*tension tower*)

Tiang penegang di samping menahan gaya berat, juga menahan gaya tarik dari konduktor-konduktor Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET). Tiang penegang terdiri dari :

- a. Tiang sudut (*angle tower*)

Tiang sudut adalah tiang penegang yang berfungsi menerima gaya tarik akibat perubahan arah Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET).

¹ SK DIR 0520, *Buku Pedoman Pemeliharaan Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET)*. (Jakarta Selatan: PT. PLN (Persero), 2014), hal. 17



Gambar 2.2 Tiang Sudut

b. Tiang akhir (*dead end tower*)

Tiang akhir adalah tiang penegang yang direncanakan sedemikian rupa sehingga kuat untuk menahan gaya tarik konduktor-konduktor dari satu arah saja. Tiang akhir ditempatkan di ujung Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET) yang akan masuk ke *switchyard* Gardu Induk.

2. Tiang penyangga (*suspension tower*)

Tiang penyangga untuk mendukung/menyangga dan harus kuat terhadap gaya berat dari peralatan listrik yang ada pada tiang tersebut.



Gambar 2.3 Tiang Penyangga

3. Tiang penyekat (*section tower*)

Tiang penyekat antara sejumlah *tower* penyangga dengan sejumlah *tower* penyangga lainnya karena alasan kemudahan saat pembangunan (penarikan konduktor), umumnya mempunyai sudut belokan yang kecil.

4. Tiang transposisi

Tiang penegang yang berfungsi sebagai tempat perpindahan letak susunan *phasa* konduktor-konduktor Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET).



Gambar 2.4 Tiang Transposisi

5. Tiang portal (*gantry tower*)

Tower berbentuk portal digunakan pada persilangan antara dua saluran transmisi yang membutuhkan ketinggian yang lebih rendah untuk alasan tertentu (bandara, tiang *crossing*).



Gambar 2.5 Tiang Portal

6. Tiang kombinasi (*combined tower*)

Tower yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda tegangan operasinya.

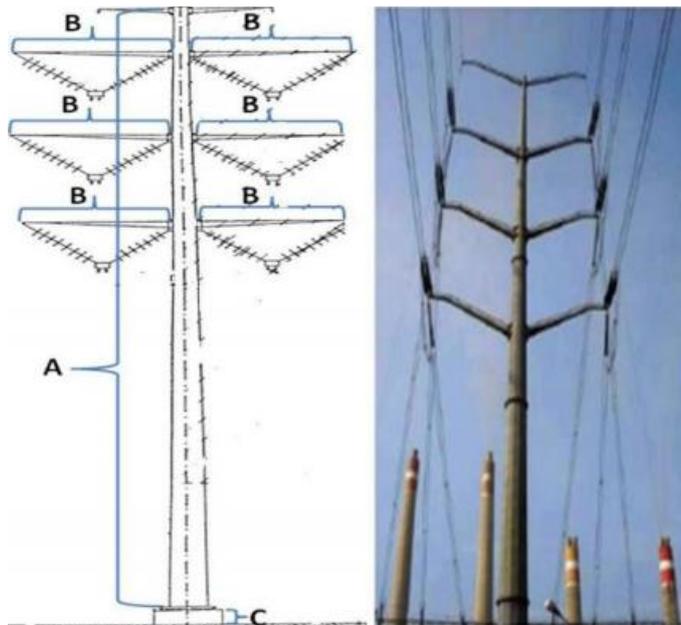


Gambar 2.6 Tiang Kombinasi

2.3.2 Tiang/Tower Menurut Bentuk

1. Tiang *pole*

Konstruksi SUTT dengan tiang beton atau tiang baja, pemanfaatannya digunakan pada perluasan SUTT dalam kota yang padat penduduk dan memerlukan lahan relatif sempit.

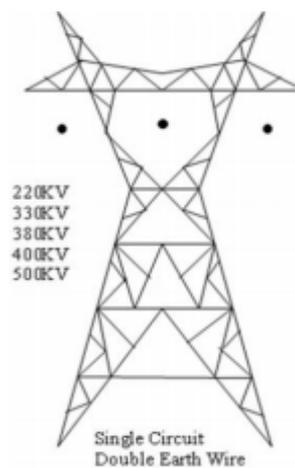


Gambar 2.7 Tiang *Pole*

2. Tiang kisi-kisi (*lattice tower*)

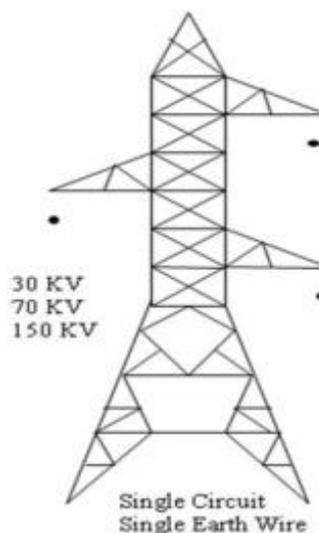
Terbuat dari baja profil, disusun sedemikian rupa sehingga merupakan suatu menara yang telah diperhitungkan kekuatannya disesuaikan dengan kebutuhannya. Berdasarkan susunan/konfigurasi penghantarnya dibedakan menjadi 3 (tiga) kelompok besar, yaitu :

1. Tiang *delta* (*delta tower*)



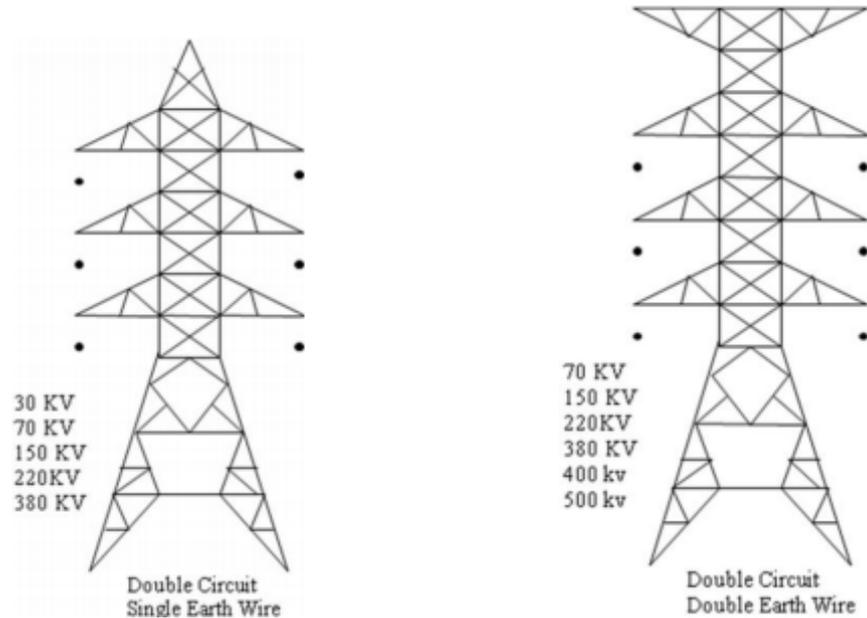
Gambar 2.8 Tiang Delta

2. Tiang *zig-zag* (*zig-zag tower*)



Gambar 2.9 Tiang Zig-Zag

3. Tiang piramida (*pyramid tower*)



Gambar 2.10 Tiang Piramida

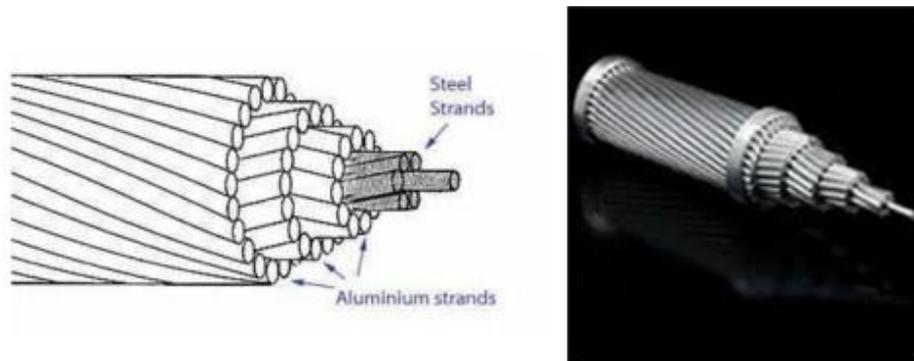
2.3.3 Jenis *Tower* SUTT Bungaran – Sungai Kedukan

Pada *tower* SUTT PHT 70 kV area kerja Bungaran – Sungai Kedukan ini menggunakan *tower* dengan jenis *lattice tower*.

2.4 Penghantar Area Kerja Bungaran – Sungai Kedukan

Pada area kerja Bungaran – Sungai Kedukan ini menggunakan konduktor dengan jenis ACSR 1×120 mm PHT 70 kV. Konduktor jenis ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) ini bagian dalamnya berupa steel yang mempunyai kuat mekanik tinggi, sedangkan bagian luarnya berupa aluminium yang mempunyai konduktivitas tinggi. Karena sifat elektron lebih menyukai bagian luar konduktor daripada bagian sebelah dalam konduktor, maka pada sebagian besar SUTT maupun SUTET menggunakan konduktor jenis ACSR. Untuk daerah yang udaranya mengandung kadar belerang tinggi dipakai jenis ACSR/AS, yaitu konduktor jenis ACSR yang konduktor steelnya dilapisi dengan aluminium.⁷

¹ SK DIR 0520, *Buku Pedoman Pemeliharaan Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET)*. (Jakarta Selatan: PT. PLN (Persero), 2014), hal. 3



Gambar 2.11 Konduktor ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*)

2.5 Pentanahan

Pentanahan merupakan salah satu faktor kunci dalam usaha pengamanan (perlindungan) instalasi listrik. Agar sistem pentanahan dapat bekerja dengan efektif, sistem pentanahan harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Membuat jalur impedansi rendah ke tanah 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 korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah, untuk menyakinkan kontinuitas penampilannya sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
4. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam pelayanan.

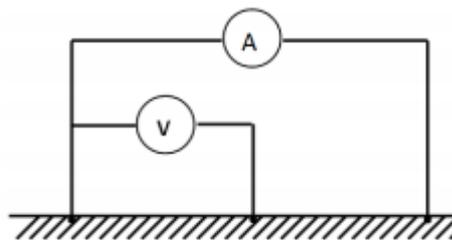
Sistem pentanahan yang baik akan memberikan keandalan pada sistem tenaga listrik, di samping keamanan yang terjaga pada sistem tenaga listrik juga peralatan lain yang mendukungnya. Secara umum, tujuan pentanahan adalah sebagai berikut :

1. Membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan yang tidak dialiri arus dan antara bagian-bagian ini dengan tanah sampai pada suatu harga yang aman (tidak membahayakan) untuk semua kondisi operasi normal atau tidak normal.

2. Memperoleh impedansi yang kecil/rendah dari jalan balik arus hubung singkat ke tanah. Apabila impedansi tinggi saat hubung singkat ke tanah terjadi akan menimbulkan perbedaan potensial yang besar dan berbahaya, dapat menimbulkan busur listrik dan pemanasan yang cukup besar pada sambungan-sambungan rangkaian pentanahan.
3. Menjaga tingkat kinerja peralatan sehingga sistem dapat berjalan dengan baik, tanpa terganggu akibat adanya gangguan yang ditimbulkan oleh sistem pentanahan yang kurang baik.
4. Menyalurkan muatan-muatan yang disebabkan oleh petir ke bumi.

2.6 Pengukuran Tahanan Pentanahan

Metode tiga titik (*three-point method*) dimaksudkan untuk mengukur tahanan pentanahan. Misalkan tiga buah batang pentanahan di mana batang 1 yang tahananannya hendak diukur dan batang-batang 2 dan 3 sebagai batang pentanahan pembantu yang juga belum diketahui tahananannya, seperti pada gambar 2.12¹⁰



Gambar 2.12 Pengukuran Tahanan Pentanahan Metode Tiga Titik

2.7 Standar Nilai Tahanan Pentanahan Tower

Pentanahan *tower* berfungsi untuk mengalirkan arus dari konduktor tanah akibat sambaran petir. Oleh karena itu, nilai tahanan dari pentanahan *tower* harus dibuat sekecil mungkin agar tidak menimbulkan tegangan *tower* yang tinggi yang pada akhirnya dapat mengganggu sistem penyaluran. Batasan nilai tahanan

¹⁰ Imam Naufal, Athollah, Laporan Akhir: "Pengukuran Pentanahan Transformator pada Gardu Distribusi di Penyulang Kutilang PT. PLN (Persero) Rayon Kerten" (Palembang: Polsri, 2018), hal, 24

pentanahan *tower* yang sesuai standar telah ditetapkan oleh PT. PLN (Persero) ini mengacu pada SK DIR 0520 2014, yakni sebagai berikut :

Tabel 2.1 Standar Nilai Tahanan Pentanahan *Tower*⁷

Peralatan yang Diperiksa	Tegangan Operasi	Standar
Pentanahan <i>Tower</i>	70 kV	$\leq 5 \Omega$
	150 kV	$\leq 10 \Omega$
	275 kV / 500 kV	$\leq 15 \Omega$

2.8 Rekomendasi Pengujian Tahanan Pentanahan *Tower*

Menurut SK DIR 0520 2014, telah ditetapkan rekomendasi pengujian tahanan pentanahan *tower*, yakni sebagai berikut¹ :

Tabel 2.2 Rekomendasi Pengujian Tahanan Pentanahan *Tower*

Peralatan yang Diperiksa	Tegangan Operasi	Hasil Ukur	Rekomendasi
Pentanahan (<i>Grounding</i>)	70 kV	$\leq 5 \Omega$	Lanjutkan pengujian rutin 1 tahunan
		$> 5 \Omega$	Perbaiki, ganti secepatnya atau diberikan penambahan pentanahan kaki tiang (<i>tower</i>)
	150 kV	$\leq 10 \Omega$	Lanjutkan pengujian rutin 1 tahunan
		$> 10 \Omega$	Perbaiki, ganti secepatnya atau diberikan penambahan pentanahan kaki tiang (<i>tower</i>)
	275 kV / 500 kV	$\leq 15 \Omega$	Lanjutkan pengujian rutin 1 tahunan
		$> 15 \Omega$	Perbaiki, ganti secepatnya atau diberikan penambahan pentanahan kaki tiang (<i>tower</i>)

¹ SK DIR 0520, *Buku Pedoman Pemeliharaan Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET)*. (Jakarta Selatan: PT. PLN (Persero), 2014), hal. 94

¹ *Ibid*, hal. 106

2.9 Sistem Pentanahan⁶

2.9.1 Sistem Pentanahan *Driven Ground*

Driven ground adalah pentanahan yang dilakukan dengan cara menancapkan batang elektroda ke tanah.

2.9.2 Sistem Pentanahan *Counterpoise*

Counterpoise adalah pentanahan yang dilakukan dengan cara menanam kawat elektroda sejajar atau radial, beberapa cm di bawah tanah (30 cm - 90 cm).

2.9.3 Sistem Pentanahan *Mesh*

Mesh adalah cara pentanahan dengan jalan memasang kawat elektroda membujur dan melintang di bawah tanah, yang satu sama lain dihubungkan di setiap tempat sehingga membentuk *mesh* (jala). Sistem pentanahan *mesh* biasanya dipasang di gardu induk dengan tujuan untuk mendapatkan nilai tahanan tanah yang sangat kecil (kurang dari 1 Ω).

2.10 Bagian-Bagian yang Ditanahkan

Bagian-bagian yang harus ditanahkan adalah (Hutauruk, 1999., Mahendra, 2004., Sutikno, 1997)⁴ :

1. Semua bagian instalasi yang terbuat dari logam (menghantar listrik) dan dapat tersentuh. Hal ini bertujuan agar potensial dari logam yang mudah disentuh manusia selalu sama dengan potensial tanah (bumi) tempat manusia berpijak sehingga tidak berbahaya bagi manusia yang menyentuhnya.
2. Bagian pembuangan muatan listrik (bagian bawah) dari *arrester*. hal ini bertujuan agar *arrester* dapat berfungsi dengan baik, yaitu membuang muatan listrik yang diterimanya dari petir ke tanah.
3. Kawat petir yang ada pada bagian atas saluran transmisi. Kawat petir ini berada di sepanjang saluran transmisi, semua kaki tiang transmisi

⁶ Putra Utama Arif, *Evaluasi Nilai Tahanan Pentanahan Tower Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Transmisi Maninjau – Simpang Empat* (Padang: Univ. Bung Hatta, 2014), hal, 4

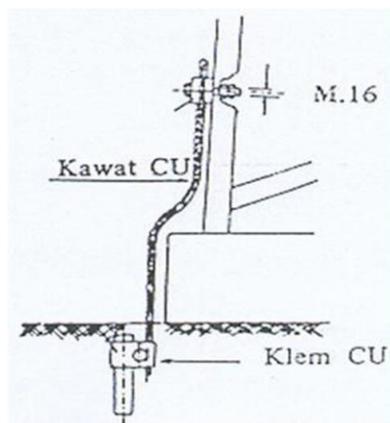
⁴ Hutauruk TS., *Pengetahuan Netral Sistem Tenaga dan Pengetahuan Peralatan* (Jakarta: Erlangga)

harus ditanahkan agar petir yang menyambar kawat petir dapat disalurkan ke tanah melalui kaki tiang saluran transmisi.

4. Titik netral dari transformator atau titik netral dari generator. Tujuan dari pentanahan titik netral adalah untuk membatasi besar arus gangguan tanah dan tegangan dari fasa-fasa yang tidak terganggu pada sistem yang terdiri dari generator dan transformator. Pemilihan metode pentanahan yang tepat dapat menghindarkan kerusakan pada peralatan sistem tenaga serta menghindarkan bahaya bagi keselamatan personil operasi dan pemeliharaan.

2.11 Jenis Elektroda Pentanahan Sumber S-PLN Tahun 2014

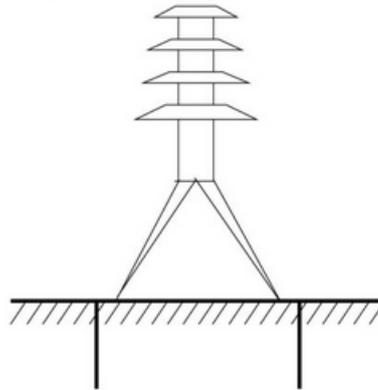
Menurut SK DIR 0520 2014, rod pentanahan adalah perlengkapan pembumian sistem transmisi yang berfungsi untuk meneruskan arus listrik dari *tower* SUTT maupun SUTET ke tanah dan menghindari terjadinya *back flashover* pada insulator saat *grounding* sistem terkena sambaran petir. *Back flashover* adalah kejadian dimana petir menyambar bagian-bagian *grounding system* (seperti *tower* dan GSW), tetapi arus petir tidak dapat dialirkan ke tanah karena *impact local grounding* desainnya yang tidak bekerja dengan baik. Pentanahan *tower* terdiri dari konduktor tembaga atau konduktor baja yang diklem pada pipa pentanahan yang ditanam di dekat pondasi tiang, atau dengan menanam plat aluminium/tembaga di sekitar pondasi *tower* yang berfungsi untuk mengalirkan arus dari konduktor tanah akibat sambaran petir.



Gambar 2.13 Pentanahan *Tower*

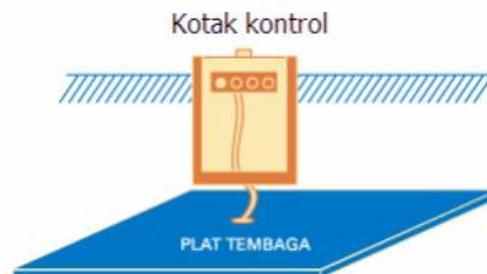
Jenis-jenis pentanahan *tower* pada SUTT/ SUTET:

1. Elektroda bar, yaitu suatu rel logam yang ditanam di dalam tanah. Pentanahan ini paling sederhana dan efektif, di mana nilai tahanan tanah adalah rendah. Elektroda ini bisa juga disebut dengan elektroda batang.



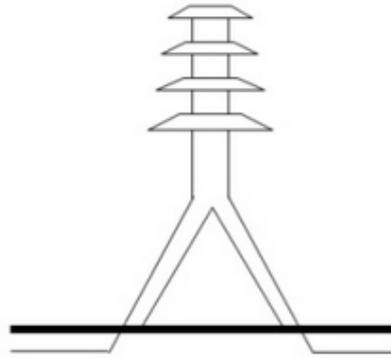
Gambar 2.14 Elektroda Bar

2. Elektroda plat, yaitu plat logam yang ditanam di dalam tanah secara horizontal atau vertikal. Pentanahan ini umumnya untuk pengamanan terhadap petir.

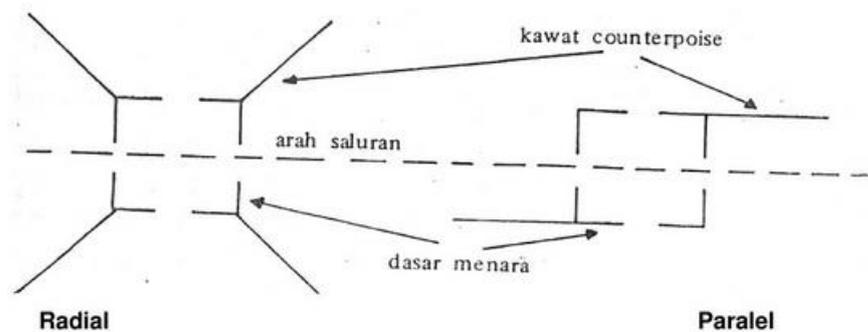


Gambar 2.15 Elektroda Plat

3. *Counterpoise electrode*, yaitu suatu konduktor yang digelar secara horizontal di dalam tanah. Pentanahan ini dibuat pada daerah yang nilai tahanan tanahnya tinggi atau untuk memperbaiki nilai tahanan pentanahan.

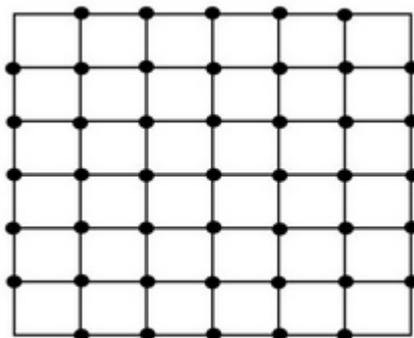


Gambar 2.16 Counterpoise Electrode



Gambar 2.17 Jenis Pemasangan Counterpoise Electrode

4. *Mesh electrode*, yaitu sejumlah konduktor yang digelar secara horizontal di tanah yang umumnya cocok untuk daerah kemiringan.



Gambar 2.18 Mesh Electrode

Komponen-komponen pentanahan *tower*:

1. Konduktor pentanahan, terbuat dari bahan yang konduktifitasnya besar.
2. Klem pentanahan atau sepatu kabel.
3. Batang pentanahan.
4. Klem sambungan konduktor pentanahan

2.12 Bahan dan Ukuran Elektroda

Menurut PUIL 2000, Sebagai bahan elektrode digunakan tembaga, atau baja yang digalvanisasi atau dilapisi tembaga sepanjang kondisi setempat tidak mengharuskan memakai bahan lain (misalnya pada perusahaan kimia).²

Tabel 2.3 Bahan dan Ukuran Minimum Elektroda

		1	2	3
No.	Bahan Jenis Elektroda	Baja Digalvanisasi dengan Proses Pemanasan	Baja Berlapis Tembaga	Tembaga
1.	Elektroda Pita	- Plat baja 100 mm ² setebal minimum 3 mm	50 mm ²	Pelat tembaga 50 mm ² tebal minimum 2 mm
		- Penghantar pilin 95 mm ² (bukan kawat halus)		Penghantar pilin 35 mm ² (bukan kawat halus)
2.	Elektroda Batang	- Pipa baja 25 mm - Baja profil (mm) L 65 x 65 x 7 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 m ² sampai 1 m ²		Pelat tembaga tebal 2 mm luas 0,5 m ² sampai 1 m ²

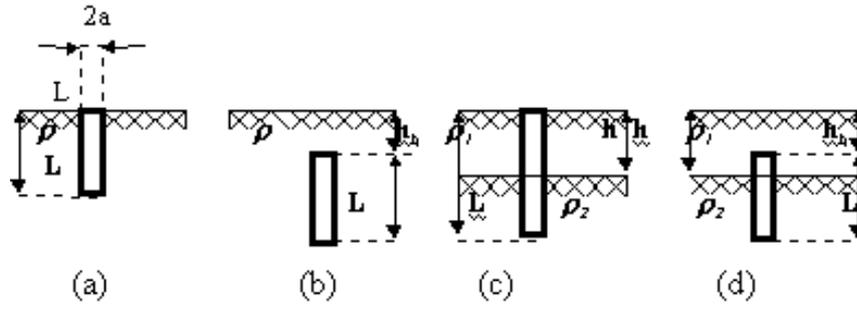
Sumber : PUIL 2000

² SNI 04-0225 Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000). (Jakarta: BSN, 2000), hal. 82

2.13 Elektroda Pentanahan

2.13.1 Elektroda Batang

Elektroda batang ialah 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 jenis ini.



Gambar 2.19 Penanaman Elektroda Batang

Untuk elektroda yang ditanam tegak lurus dekat permukaan tanah (seperti Gambar 2.19-a). Seorang insinyur listrik asal Amerika - Kanada bernama H.B. Dwight mengembangkan rumus dari nilai tahanannya, yaitu⁵ :

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

Di mana :

- R = Tahanan batang dari satu batang elektroda (Ω)
- L = Panjang batang elektroda dalam tanah (m)
- α = Jari-jari batang elektroda (m)
- ρ = Tahanan jenis tanah (Ω.m)

Untuk elektroda yang ditanam tegak lurus pada kedalaman beberapa cm dari permukaan tanah (Gambar 2.19-b), nilai tahanannya, yaitu :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi.L} \left(\ln \frac{2L}{\alpha} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

Untuk elektroda yang ditanam tegak lurus dekat permukaan tanah dan menembus lapisan tanah kedua (Gambar 2.19-c), nilai tahanannya, yaitu :

$$R = \frac{\rho_2}{2\pi.L} \left(\ln \frac{4L}{\alpha} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

⁵ Farmada Andre, *Studi Pengukuran Tahanan Pentanahan Tower Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV Pedan-Ungaran* (Surakarta: UMS, 2016), hal, 7

Untuk elektroda yang ditanam tegak lurus pada kedalaman beberapa cm dari permukaan tanah dan menembus lapisan tanah kedua (Gambar 2.19-d) nilai tahanannya, yaitu :

$$R = \frac{\rho_2}{2\pi(h-h_b)} \left(\ln \frac{2L}{\alpha} - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \cdot \ln 2)h_b}{L}} \right) + \frac{\rho_1}{h} \cdot \varphi_0 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\varphi_0 = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N}{F_0} - 1 \right)^2 + 1}} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

$$F_0 = \frac{L}{1 - 0,9 \times K} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Di mana :

R = Tahanan batang dari satu batang elektroda (Ω)

L = Panjang batang elektroda dalam tanah (m)

α = Jari-jari batang elektroda (m)

ρ_1 = Tahanan jenis lapisan tanah pertama ($\Omega \cdot m$)

ρ_2 = Tahanan jenis lapisan tanah kedua ($\Omega \cdot m$)

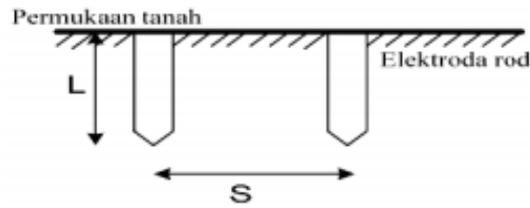
h_b = Kedalaman penanaman elektroda (m)

h = Jarak permukaan tanah ke tanah lapisan kedua (m)

K = Faktor refleksi

N = Jumlah batang elektroda

Dua batang elektroda yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah pada Gambar 2.20 dapat dilihat bahwa kedua batang elektroda yang berbentuk silinder dengan panjang L yang ditanam tegak lurus permukaan tanah dan dihubungkan di atas tanah dengan jarak S di antara dua batang elektroda tersebut.



Gambar 2.20 Dua Elektroda Batang

Rumus untuk dua batang elektroda yang ditanam tegak lurus di dalam tanah juga diturunkan oleh H.B. Dwight dengan besar tahanan pentanahan ialah :

a.) Untuk $S < L$, yaitu :

$$R = \frac{\rho}{4\pi.L} \left(\ln \frac{4L}{\alpha} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2.L} - \frac{S^2}{16.L^2} + \frac{S^4}{512.L^4} \right) \dots\dots\dots(2.8)$$

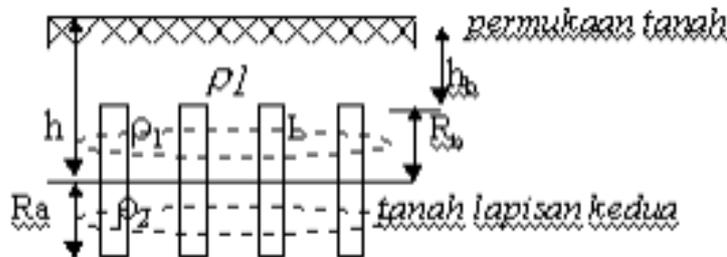
b.) Untuk $S > L$, yaitu :

$$R = \frac{\rho}{4\pi.L} \left(\ln \frac{4L}{\alpha} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi.S} \left(1 - \frac{L^2}{3.S^2} + \frac{2.L^4}{5.S^4} \right) \dots\dots\dots(2.9)$$

Di mana :

- S = Jarak penanaman antara kedua elektroda (m)
- L = Panjang batang elektroda dalam tanah (m)
- α = Jari-jari batang elektroda (m)
- ρ = Tahanan jenis tanah ($\Omega.m$)

Beberapa batang elektroda ditanam tegak lurus ke dalam tanah. Untuk jumlah konduktor yang lebih banyak, tahanan pentanahan akan lebih kecil dan distribusi tegangan akan semakin merata. Penanaman elektroda yang tegak lurus ke dalam tanah dapat berbentuk bujur sangkar atau empat persegi panjang dengan jarak antara batang elektroda adalah sama seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.21 Beberapa Elektroda yang Ditanam

Nilai tahanan pentanahan untuk beberapa batang elektroda yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah di mana rod menembus lapisan tanah paling bawah/kedua, dihitung dengan mengikuti persamaan berikut :

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}}$$

Di mana R_t adalah tahanan total elektroda batang rod (Ω).

$$R_a = \frac{\rho_2}{(L+h_b-h)} \cdot g_0 \cdot \frac{F_0}{N} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$R_b = \frac{\rho_1}{(h-h_b)} \cdot g_0 \cdot \frac{F_0}{N} + \frac{\rho_1}{h} \cdot \varphi_0 \dots\dots\dots(2.11)$$

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2L}{a} \right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \cdot \ln 2) \cdot h_b}{L}} \right] \dots\dots\dots(2.12)$$

Untuk pengukuran nilai tahanan pentanahan secara gabungan, yaitu 4 elektroda batang yang ditanam secara paralel pada tiap kaki tower, perhitungan nilai tahanan total pengukuran tower, yaitu pembagian antara 4 elektroda atau dapat dituliskan dengan rumus R paralel sebagai berikut :

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \dots\dots\dots \frac{1}{R_n} \Omega \dots\dots\dots(2.12)^5$$

Di mana :

R_p = Tahanan total (Ω)

R_1 = Tahanan batang elektroda 1 (Ω)

R_2 = Tahanan batang elektroda 2 (Ω)

R_3 = Tahanan batang elektroda 3 (Ω)

R_4 = Tahanan batang elektroda 4 (Ω)

R_n = Tahanan batang elektroda n (Ω)

⁵ Farmada Andre, *Studi Pengukuran Tahanan Pentanahan Tower Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV Pedan-Ungaran* (Surakarta: UMS, 2016), hal. 6

2.14 Tahanan Jenis Tanah

Faktor paling dominan mempengaruhi tahanan sistem pentanahan adalah tahanan jenis tanah di mana elektroda pentanahan ditanam. Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung beberapa faktor, yaitu :

- a. Jenis tanah²

Tabel 2.4 Tahanan Jenis Tanah

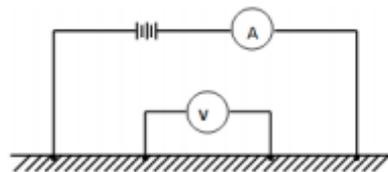
1	2	3	4	5	6	7
Jenis Tanah	Tanah rawa	Tanah liat & tanah ladang	Pasir basah	Kerikil basah	Pasir dan kerikil kering	Tanah berbatu
Resistansi Jenis (Ω -m)	30	100	200	500	1000	3000

Sumber: PUIL 2000

- b. Lapisan tanah (berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan atau sama)
- c. Kelembapan tanah
- d. Temperatur

2.15 Pengukuran Tahanan Jenis Tanah

Pengukuran tahanan jenis tanah dengan metode empat titik (*four-point method*) menggunakan empat buah elektroda, sebuah batere, sebuah amperm, dan sebuah voltm yang sensitif, sebagaimana terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.22 Pengukuran Tahanan Jenis Tanah Metode Empat Titik

2.16 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Tahanan Jenis Tanah

Beberapa faktor yang mempengaruhi tahanan jenis tanah antara lain:

² SNI 04-0225 Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000). (Jakarta: BSN, 2000), hal. 80

a. Kadar garam tanah

Kandungan zat-zat kimia dalam tanah terutama sejumlah zat organik maupun anorganik yang dapat larut perlu untuk diperhatikan. 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.

b. Pengaruh kandungan air (kelembaban)

Kelembaban tanah sangat berpengaruh terhadap perubahan tahanan jenis tanah terutama kandungan air tanah sampai dengan 20%. Dalam salah satu test laboratorium untuk tanah merah penurunan kandungan air tanah dari 20% ke 10% menyebabkan tahanan jenis tanah sampai 30 kali. Kenaikan kandungan air tanah di atas 20% pengaruhnya sedikit sekali. Semakin lembab kadar air pada lapisan tanah tersebut semakin tinggi dan tahanan jenisnya akan semakin rendah.

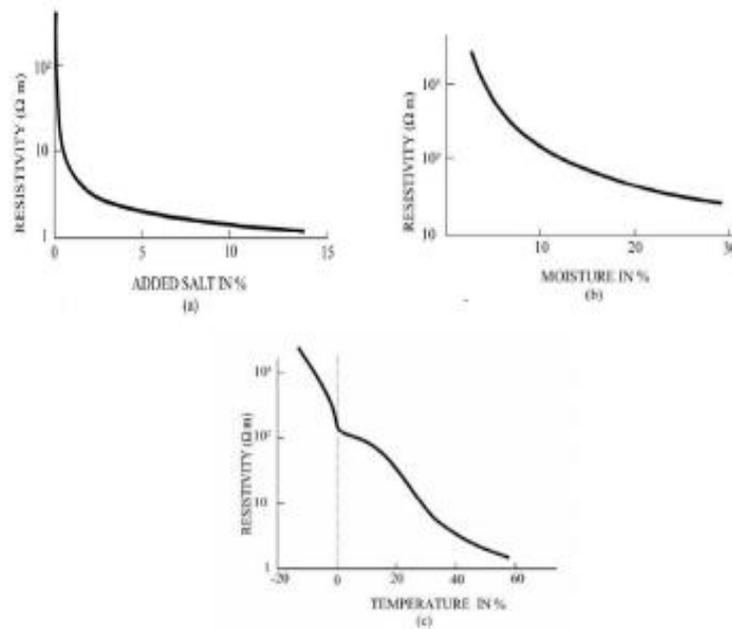
c. Pengaruh temperatur

Pengaruh temperatur pada tahanan jenis tanah sangat kecil sekali pada kondisi di atas titik beku air (0°), sedangkan untuk kondisi di bawah titik beku tahanan jenis tanah bertambah besar. Hal ini di karenakan pada temperatur di bawah titik beku molekul-molekul air dalam tanah sulit untuk bergerak sehingga daya hantar listrik tanah menjadi sangat rendah. Bila temperatur naik, kebekuan tersebut akan menjadi cair, molekul-molekul dan ion-ion bebas bergerak sehingga daya hantar listrik tanah menjadi besar atau tahanan jenis tanah akan turun. Temperatur tanah juga dipengaruhi oleh musim lingkungan tersebut.

d. Pengaruh kandungan elektrolit tanah

Kandungan elektrolit merupakan suatu zat yang dapat menghantarkan listrik. Zat tersebut dapat menghantarkan listrik karena zat tersebut memiliki ion-ion yang bergerak bebas di dalam larutan tersebut. Ion-ion inilah yang nantinya akan menjadi penghantar. Semakin banyak

ion yang dihasilkan semakin baik kandungan tersebut menghantarkan listrik. Secara grafik pengaruh kandungan garam, kelembaban tanah dan temperatur jenis tanah dapat dilihat pada gambar 2.21.



Gambar 2.23 Grafik Pengaruh Tahanan Jenis Karena: a. Kandungan Garam; b. Kelembaban Tanah; c. Temperatur