

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Pembumian

Sistem pembumian dirancang untuk tindakan pengamanan terhadap gangguan yang terjadi pada jaringan listrik dan peralatan. Dalam kenyataannya tidak semua sistem jaringan listrik dihubungkan langsung dengan sistem pembumian. Sistem yang tidak ditanahkan adalah suatu sistem yang memang sengaja tidak dihubungkan dengan sistem pembumian langsung kecuali dihubungkan dengan alat ukur atau peralatan proteksi lainnya. Sebenarnya sistem ini dihubungkan dengan pembumian, namun tidak secara langsung melainkan melalui distribusi kapasitansi dari belitan fasa dan penghantar. Sistem pembumian digunakan untuk menyalurkan arus gangguan seperti hubung singkat, petir, maupun arus bocor, sehingga aman bagi peralatan maupun untuk manusia. Yang menjadi acuan kita adalah bahwa semakin kecil nilai dari resistansi bumiannya maka akan semakin baik, karena arus cenderung akan mengalir pada resistansi yang lebih kecil dibandingkan dengan resistansi yang besar. Sistem yang ditanahkan adalah suatu sistem yang dihubungkan dengan sistem pembumian langsung dengan netral atau satu penghantar padat ke tanah atau melewati batas arus impedansi. Macam-macam pembumian dengan menggunakan bahan padat untuk impedansi tinggi, seperti resistansi. Menurut IEEE Buff Book std 242-1986 menjelaskan bahwa secara umum jenis sistem pembumian untuk industri dan sistem tenaga komersil dibagi menjadi 6, yaitu : sistem pembumian tanpa impedansi, sistem pembumian dengan resistansi rendah, sistem pembumian dengan resistansi tinggi, sistem yang tidak diketanahkan (sistem delta), sistem pembumian dengan reaktansi, sistem pembumian dengan kumparan Petersen.

2.1.1. Tujuan pembumian peralatan

Salah satu faktor penting dalam setiap usaha pengamanan (perlindungan) rangkaian listrik adalah pembumian. Apabila tindakan pengamanan yang baikakan dilaksanakan, maka harus ada sistem pembumian yang dirancang dengan benar pembumian peralatan sendiri sebagai salah satu usaha pengamanan memiliki tujuan sebagai berikut: (Hutauruk, 1999 : 125)

- a. Untuk memperoleh potensial yang merata (*uniform*) dalam semua bagian struktur dan peralatan. dan juga untuk menjaga operator atau orang yang berada pada daerah

instalasi itu berada pada potensial yang sama dan tidak berbahaya pada setiap waktu. Dengan dicapainya potensial yang hampir merata pada semua titik dalam daerah sistem pembumian ini. Kemungkinan timbulnya perbedaan *potensial* yang besar pada jarak yang dapat dicapai oleh manusia sewaktu hubung singkat kawat ketanah menjadi sangat kecil.

- b. Untuk memperoleh impedansi yang kecil atau rendah dan jalan balik arus hubung singkat ke tanah. Kecelakaan pada manusia timbul pada saat hubung singkat ke tanah terjadi. Jadi bila arus hubung singkat ke tanah itu dipaksakan mengalir melalui impedansi tanah yang tinggi, ini akan menimbulkan perbedaan yang besar dan berbahaya. Juga impedansi yang besar pada sambungan- sambungan pada rangkaian pembumian dapat menimbulkan busur listrik dan pemanasan yang besarnya cukup menyalakan material yang mudah terbakar.

2.1.2. Syarat sistem pembumian

Dalam fungsinya sebagai salah satu usaha pengamanan, maka sistem pembumian harus mampu bekerja dengan efektif yakni dengan memenuhi syarat-syarat sebagai berikut: (Abdul Hadi, 1994 : 154)

- a. Membuat jalur impedansi rendah peralatan, menggunakan rangkaian yang efektif.
- b. Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat surja hubung.
- c. Memuat elektroda yang terbuat dari bahan-bahan yang tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah, untuk menyakinkan kontinuitas penampilannya sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
- d. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudahnya dalam pelayanan.

2.2. Sistem Pembumian Sebagai konduktor

Tahanan dalam sistem Pembumian merupakan komposisi dari: (Abdul Hadi, 1994 : 158)

- a. Tahanan pasak (elektroda pembumian) yang terbuat dari logam dan sambungan – sambungannya.
- b. Tahanan kontak antara elektroda pembumian dengan tanah sekitar.
- c. Tahanan jenis tanah di sekitar elektroda pembumian.

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

besar, sehingga tahanannya dapat diabaikan terhadap tahanan keseluruhan sistem pembumian.

Tahanan antara elektroda dan tanah jauh lebih kecil dan yang biasanya diduga. Apabila elektroda bersih dan cat atau minyak, dan tanah dapat dipasak dengan kuat, maka Biro Standarisasi Nasional Amerika Serikat menyatakan bahwa tahanan kontak dapat diabaikan.

2.3. Pembumian Rod

Persamaan-persamaan untuk tahanan tanah dari berbagai sistem elektroda cukup rumit, dan dalam beberapa hal dapat dinyatakan dalam pendekatan-pendekatan. Semua pernyataan dalam persamaan-persamaan itu diperoleh dari hubungan $R = \rho L / A$ dan didasarkan pada asumsi bahwa tahanan tanah seragam pada seluruh volume tanah, kendati hal ini tidak mungkin atau sangat jarang ada. Rumus yang biasa digunakan untuk pasak tunggal dikembangkan oleh Professor H.B. Dwight dari institut Teknologi Massa-chusetts yaitu : (Hadi, Abdul. 1994: 158)

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

dengan,

ρ : tahanan jenis tanah (ohm-m)

L : panjang pasak tanah (m)

a : jari-jari penampang pasak (m)

R : tahanan pasak ke tanah (ohm)

Apabila pasak ditanam lebih dalam ke tanah, maka tahanan akan berkurang. Secara umum dapat dikatakan, dua kali lipat lebih dalam tahanan berkurang 40%. Namun, bertambahnya diameter pasak secara material tidak akan mengurangi tahanan. Dua kali lipat diameter misalnya, hanya mengurangi besarnya tahanan kurang dari 10%. (Hadi, Abdul. 1994 : 159)

2.4. Pembumian Grid (Mesh)

Pembumian *grid* adalah suatu sistem pembumian yang dilakukan dengan cara menanamkan batang elektroda pembumian sejajar dengan permukaan tanah dan elektroda-elektroda tersebut dihubungkan satu sama lain sehingga membentuk kelompok *mesh*. Pembumian *grid* dilakukan untuk mengatasi timbulnya gradien tegangan yang tidak rata pada permukaan tanah. Apabila jumlah konduktor yang di tanah banyak maka hal ini akan

mendekati pembumian yang paling ideal yaitu pembumian plat. Walaupun dengan sistem pembumian plat didistribusi tegangan paling baik selama kondisi gangguan namun masih perlu dipertimbangkan masalah biaya.

Untuk mendapatkan tahanan pembumian yang rendah serta gradien tegangan yang rata maka dilakukan penanaman beberapa batang elektroda yang membentuk *grid* (kisi-kisi atau jaring-jaring). Bentuk *grid* yang umum di pakai adalah bujur sangkar atau persegi panjang yang mana dalam satu *grid* dapat membentuk beberapa *mesh*.

Tahanan pembumian sebagian besar tergantung pada panjang elektroda dan sedikit tergantung pada ukuran penampangnya. Jika beberapa elektroda diperlukan untuk memperoleh tahanan pembumian rendah, jarak antar elektroda tersebut minimum harus dua kali lipat panjangnya, (PUIL 2000).

Pembumian yang ideal harus memberikan nilai tahanan pembumian mendekati nol atau kurang dari sama dengan 1 ohm untuk gardu induk bertegangan tinggi (ANSI/IEEE Std 80-1986). Sebagai perkiraan pertama, sebuah nilai minimum dari tahanan pembumian grid gardu induk pada tanah yang seragam untuk lapisan pertama (permukaan tanah) saja dapat dihitung dengan persamaan :

$$R_G = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (2-2)$$

dengan,

R_G : tahanan pembumian grid (ohm)

ρ : tahanan jenis tanah (ohm-m)

A : luas area pembumian grid (m^2)

Kemudian, pada lapisan kedua dengan adanya gabungan antara *grid* dan batang *rod* untuk tanah yang seragam, jumlah konduktor grid dan konduktor batang rod yang ditanam pada kedalaman tertentu, diperoleh persamaan seperti dibawah ini : (Laurent, P. G., 1951 dan Nieman, J, 1952)

$$R_G = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad (2-3)$$

Dengan L : total dari panjang konduktor yang tertanam (m). Jadi metode yang digunakan untuk menghitung tahanan pembumian *grid* untuk kedalaman tertentu yakni $0,25 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$ merupakan persamaan empiris yang diturunkan oleh Laurent dan Nieman sebagai berikut : (IEEE std 80 1986)

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (2-4)$$

dengan :

R_G : tahanan pembumian (ohm)

L : total panjang konduktor (m)

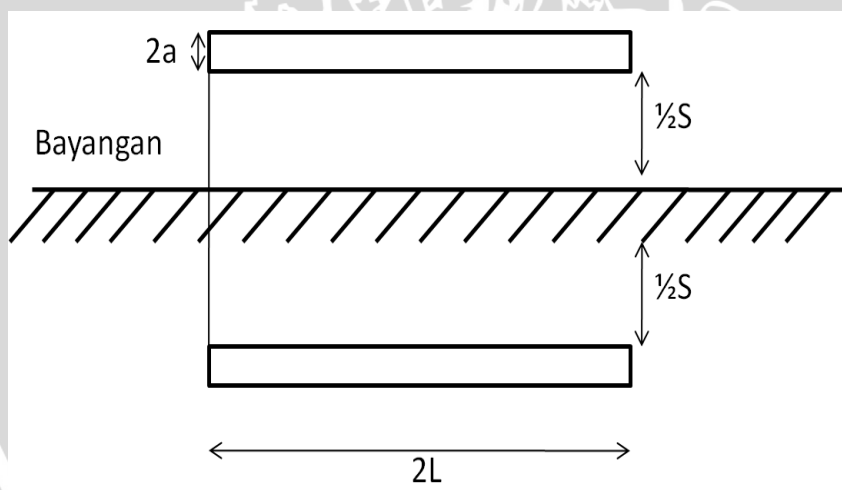
ρ : tahanan jenis tanah (ohm-m)

h : kedalaman penanaman (m)

A : luas daerah yang dilingkupi (m^2)

2.4.1 Penanaman batang elektroda tunggal sejajar permukaan tanah

Untuk menghitung nilai tahanan pembumian satu batang elektroda yang ditanam sejajar permukaan tanah prinsipnya sama dengan perhitungan untuk penanaman dua batang elektroda yang tegak lurus permukaan tanah. Dalam hal ini efek bayangan masih tetap diperhitungkan. Untuk lebih jelasnya penanaman elektroda tunggal sejajar permukaan tanah dapat di gambarkan seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Penanaman Elektroda Tunggal Sejajar Permukaan Tanah
Sumber : Tagg,1964:143

Keterangan :

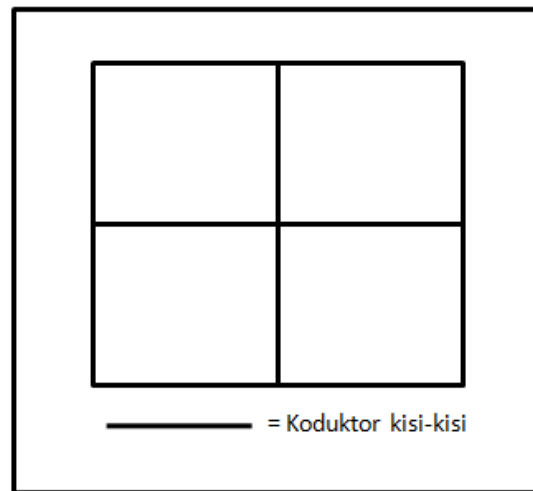
$2a$: diameter koduktor pembumian

$2L$: panjang koduktor pembumian

$\frac{1}{2} S$: jarak elektroda pembumian dengan permukaan tanah

2.4.2. Penanaman beberapa batang elektroda sejajar permukaan tanah (*mesh*)

Sebagaimana yang telah diuraikan di depan bahwa untuk mendapatkan tahanan pembumian yang rendah serta gradien tegangan yang rata maka dilakukan penanaman beberapa batang elektroda yang membentuk *mesh* (kisi-kisi atau jaring-jaring). Bentuk *mesh* yang umum dipakai adalah bujur sangkar atau persegi panjang yang mana dalam satu *grid* dapat terbentuk beberapa *mesh*. Contoh pembumian *grid* dengan *mesh* seperti tampak pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Sistem Pembumian Grid
Sumber : IEEE std 80, 1986

2.5. Jenis-jenis Elektroda Pembumian

Yang dimaksud dengan elektroda pembumian adalah elektroda dan bahan metal (biasanya dari bahan tembaga) yang ditanam dalam tanah yang digunakan untuk pembumian. Dalam PUIL 1977 pasal 330, elektroda-elektroda pembumian dapat dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu elektroda batang, elektroda plat, elektroda pita, dan juga elektroda dari bahan-bahan yang lain. (Harten, Van. 1985 : 238)

2.5.1. Elektroda batang

Elektroda batang dibuat dan pipa atau besi baja profil yang dipancangkan tegak lurus ke dalam tanah Panjang elektroda yang harus digunakan, disesuaikan dengan tahanan pembumian yang diperlukan.

Untuk memancangkan elektroda ini sering digunakan *palu lantak*, Elektroda-elektrodatersebut dapat Juga dimasukkan ke dalam tanah dengan getaran dengan menggunakan *palu kango*.

Kalau tanahnya kering, kadang-kadang sangat sulit untuk mencapai tahanan penyebaran yang cukup rendah. Dalam hal ini, ada kalanya sifat-sifat tanah itu dapat diperbaiki dengan mengolah dengan bahan-bahan kimia.

Kalau digunakan beberapa elektroda batang yang dihubungkan paralel, jarak antara elektroda-elektroda ini harus sekurang-kurangnya sama dengan 2 panjang efektif dari satu elektroda, atau sekurang-kurangnya ukuran 4 meter. Elektroda-elektroda itu tidak boleh berada dalam corong tegangan dan elektroda di sampingnya. Pembumian dengan menggunakan elektroda batang juga disebut *pembumian dalam*.

Adapun beberapa hal penting yang perlu diperhatikan dalam pemilihan elektroda batang dalam suatu sistem pembumian antara lain : (Tadjuddin, 1998)

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

2.5.2. Elektroda plat

Elektroda plat dibuat dari plat logam, plat logam berlubang atau dari kawat kasa. Plat ini ditanam tegak lurus di dalam tanah, dengan tepi atasnya sekurang-kurangnya satu meter di bawah permukaan tanah. Luas plat yang harus digunakan tergantung pada tahanan pembumian yang diperlukan. Pada umumnya selembar plat ukuran 1 m x 0,5 m sudah cukup.

Kalau digunakan beberapa plat yang dihubungkan paralel untuk memperoleh tahanan pembumian yang lebih rendah, jarak antara plat-plat ini harus sekurang-kurangnya 3 meter. Untuk mencapai tahanan pembumian yang sama, elektroda plat memerlukan lebih banyak bahan dibandingkan dengan elektroda pita atau elektroda batang.

2.5.3. Elektroda pita

Elektroda pita dibuat dari hantaran berbentuk pita atau batang bulat, atau dari hantaran yang dipilin. Elektroda pembumian ini berbentuk radial, lingkaran atau suatu kombinasi dari bentuk-bentuk tersebut. Elektroda pita berbentuk radial harus disusun simetris,

Jumlah jari-jari yang digunakan tidak perlu lebih dari enam. Penambahan jari-jari melebihi jumlah ini tidak akan banyak mengurangi tahanan pembumiannya.

2.5.4. Jenis-jenis elektroda lain

Jenis-jenis elektroda lain dalam sistem pembumian sebagai berikut: (Harten, Van. 1985 : 240)

a. Jaringan pipa air

Jaringan pipa air dari logam dapat juga dipakai sebagai elektroda pembumian. Jika saluran air minum di dalam rumah atau gedung dipakai untuk pembumian, ujung-ujung pipa di kedua sisi dari meterair harus saling dihubungkan dengan baik.

b. Selubung logam dari kabel tanah

Selubung logam dari kabel tanah ini yang tidak dibungkus dengan bahan las sintesis dan ditanam langsung dalam tanah, dapat dipakai sebagai elektroda pembumian. Di kedua sisi dari kotak sambung, selubung logam ini harus saling dihubungkan dengan hantaran. Konduktivitas hantaran penghubung ini harus sekurang-kurangnya sama dengan konduktivitas selubung logam tersebut.

2.6. Bahan Dan Ukuran Elektroda Pembumian

2.6.1. Bahan elektroda pembumian

Elektroda pembumian yang digunakan biasanya berasal dari bahan tembaga, batang besi tahan karat (*stainless rod*), plat besi, maupun baja yang digalvanising agar elektrodanya tidak mudah korosi. Bahan ini harus kuat, tahan pengaruh kimia, tahan pengaruh perubahan iklim dan tahan lama. Adapun konstanta bahan penghantar terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Konstanta bahan penghantar

Material	Conductivity (%)	T_m^a (°C)	K_f
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad steel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad steel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad steel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.20
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

Sumber : IEEE std 80, 1986:44

Namun, pada kenyataannya luas penampang harus dibuat lebih besar karena alasan-alasan, sebagai berikut : (IEEE std 80, 1986:45)

- Secara mekanis konduktor tersebut harus cukup kuat, karena konduktor tersebut akan cukup lama berada dalam tanah dan mungkin pada suatu saat terjadi gaya mekanis yang cukup besar.
- Sangat sukar untuk melakukan pengecekan terhadap kawat yang ditanamkan, sehingga sebaiknya faktor pengaman dibuat sebesar mungkin.

2.6.2. Ukuran elektroda pbumian

Ukuran-ukuran minimum yang harus digunakan untuk elektroda pbumian diberikan dalam Tabel 2.2.

Kalau tanahnya sangat korosif, atau digunakan elektroda baja tanpa lapisan seng atau lapisan tembaga, sebaiknya digunakan ukuran-ukuran minimum 1,5 x ukuran-ukuran yang diberikan pada Tabel 2.2. Kalau elektroda yang dimaksudkan untuk mengatur gradien tegangan, luas penampang minimum yang boleh digunakan adalah sebagai berikut : (Harten, Van. 1985 : 240)

- Untuk baja berlapis seng : minimum 16 mm²
 Untuk baja berlapis tembaga : minimum 16 mm²
 Untuk tembaga : minimum 10 mm²

Tabel 2.2. Ukuran-ukuran minimum elektroda pembedaan

Jenis Elektroda	Bahan		
	Baja Berlapis Seng (Proses panas)	Baja Berlapis Tembaga	Tembaga
Elektroda Pita	<p><i>Pita baja :</i> Luas penampang 100 mm² Tebal : 3 mm <i>Hantaran Pilin:</i> (bukan kawat halus) Luas penampang : 95 mm²</p>	<p>Luas penampang : 50 mm²</p>	<p><i>Pita tembaga :</i> Luas penampang : 50 mm² Tebal : 2 mm <i>Hantaran pilin:</i> (bukan kawat halus) Luas penampang : 35 mm²</p>
Elektroda Batang	<p><i>Pipa baja :</i> Diameter : 1” Baja profil : 65 x65 x 7 mm (atau batang profil lain yang setaraf)</p>	<p>Baja bulat : Diameter : 15 mm Tebal lapisan Tembaga : 2,5 mm</p>	<p><i>Pipa tembaga :</i> Luas penampang : 50 mm² Tebal : 2 mm <i>Hantaran pilin: (bukan kawat halus)</i> Luas penampang : 35 mm²</p>
Elektroda Plat	<p><i>Plat baja :</i> Luas : 0,5 – 1 m² Tebal : 3 mm</p>		<p><i>Plat tembaga :</i> Luas : 0,5 – 1 m² Tebal 2 mm</p>

Sumber : PUIL 2000

2.7. Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah bervariasi dari 500 sampai 50.000 Ω-cm. pernyataan Ω-cm merepresentasikan tahanan di antara dua permukaan yang berlawanan dari suatu volume yang berisi 1 cm³.

Sering dicoba untuk mengubah komposisi kimia tanah dengan memberikan garam pada tanah dekat elektroda pembedaan dengan maksud mendapatkan tahanan jenis tanah yang rendah. Cara ini hanya baik untuk sementara sebab proses penggaram harus dilakukan secara periodik, sedikitnya enam bulan sekali.

Dengan memberi air atau membasahi tanah juga mengubah tahanan jenis tanah. Harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangat bergantung dengan keadaan cuaca. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata-rata untuk keperluan perencanaan maka diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu tertentu

misalnya selama satu tahun. Biasanya tahanan tanah juga tergantung dari tingginya permukaan tanah dari permukaan air yang konstan.

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, pembumian dapat dilakukan dengan menanamkan elektroda pembumian sampai mencapai kedalaman dimana terdapat air tanah yang konstan. Pada sistem pembumian yang tidak mungkin atau tidak perlu untuk ditanam lebih dalam sehingga mencapai air tanah yang konstan, variasi tahanan jenis tanah sangat besar. Karena kadangkala penanaman memungkinkan kelembaban dan temperature bervariasi, harga tahanan jenis tanah harus diambil untuk keadaan yang paling buruk, yaitu tanah kering dan dingin. (T.S. Hutauruk,1999:141)

2.7.1. Faktor yang mempengaruhi tahanan jenis tanah

Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung dari beberapa faktor yaitu: (T.S. Hutauruk,1999:141)

- Jenis Tanah : tanah liat, berpasir, berbatu dan lain-lain
- Lapisan tanah : Berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan
- Kelembaban tanah
- Temperatur tanah

Untuk beberapa beberapa macam jenis tanah dari berbagai unsur tanah ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Harga tahanan jenis unsur tanah

Jenis Tanah	Tahanan Jenis (Ωm)
Pasir (Sand)	400 - lebih
Tanah pasir (Sand Soil)	300
Tanah liat (Loamy soil)	100
Tanah lempung (Clay)	60
Tanah kapas hitam (Black cotton soil)	50
Tanah uruk	20
Tanah sungai (River soil)	10 - 50

Sumber : Chourasia, MP. 1979

Sedangkan harga tahanan jenis tanah yang berbeda-beda sesuai Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2000) ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Tahanan jenis tanah pada tipe tanah yang berbeda-beda

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
Resistans jenis (Ωm)	30	100	200	500	1000	3000

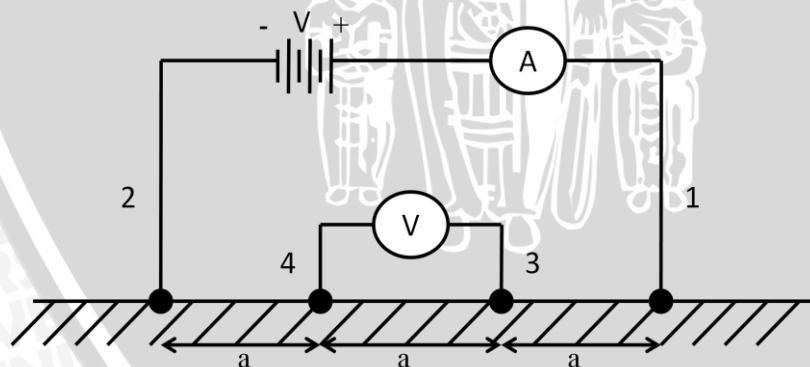
Sumber : PUIL 2000

2.8. Pengukuran Resistivitas Tanah dan Resistansi Tanah

Pengukuran resistivitas tanah biasanya dilakukan dengan cara : (T.S. Hutauruk,1999:142)

- Metode empat elektroda
- Metode tiga titik

Pengukuran resistivitas tanah dengan metode empat elektroda menggunakan empat elektroda, sebuah batere, sebuah ammeter dan sebuah voltmeter yang sensitif, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Pengukuran resistivitas tanah dengan metode empat elektroda

Sumber : Hutauruk, 1999 :142

Bila arus I masuk ke tanah melalui salah satu elektroda dan kembali ke elektroda yang lain yang cukup jauh sehingga pengaruh diameter konduktor dapat diabaikan. Arus yang 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 $2 \pi r^2$, dan rapat arus radial pada jarak r adalah :

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}. \quad (2-5)$$

Bila ρ adalah resistivitas tanah, maka kuat medan dalam tanah dengan jarak r adalah $E(r)$:
 J (T.S.Hutauruk, 1999:142).

$$E(r) = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (2-6)$$

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

$$V = \int_r^\infty E(r)dr = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (2-7)$$

Perbandingan antara tegangan dan arus atau tahanan menjadi :

$$R = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (2-8)$$

Dari Gambar 2.3, terlihat $r_{13} = r_{34} = r_{24} = a$

Jadi :

$$V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) \quad (2-9)$$

$$V_4 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) \quad (2-10)$$

Beda tegangan dan resistansi antara titik 3 dan 4 adalah :

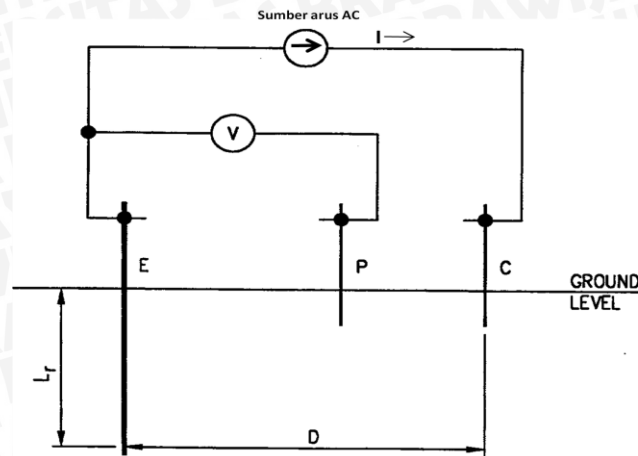
$$V_{34} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = \frac{I\rho}{2\pi a} \quad (2-11)$$

$$R_{34} = \frac{V_{34}}{I} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (2-12)$$

Jadi :

$$\rho = 2\pi a R_{34} \quad (2-13)$$

Metode tiga titik dimaksudkan untuk mengukur nilai resistansi pembumian yaitu dengan memasang tiga buah elektroda batang bantu dengan jarak tertentu. Dengan memberikan sumber arus yang dipasang antara elektroda batang utama (E) dengan elektroda batang bantu (C), serta memasang voltmeter yang dipasang antara elektroda batang utama (E) dengan elektroda batang bantu (P), seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.4



Gambar 2.4. Metode pengukuran resistansi pembumian tiga titik
Sumber : IEEE std 80, 1986:55

D adalah jarak antara elektroda batang utama (E) dengan elektroda batang bantu (C), dan elektroda batang bantu (P) dimasukkan ke tanah dengan jarak minimal $\frac{1}{2} D$ dari elektroda batang utama (E).

Setelah menetapkan besar arus yang dialirkan ke tanah dan didapatkan hasil pengukuran pada voltmeter, lalu untuk mendapatkan nilai resistansi tanahnya dapat dihitung dengan memakai persamaan :

$$V = R \cdot I \quad (2-14)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (2-15)$$

dengan:

V : tegangan yang terukur oleh voltmeter (volt)

I : besar arus yang diinjeksikan oleh sumber arus (ampere)

R : resistansi tanah (ohm)

Untuk mengetahui resistivitas tanah harus dilakukan pengukuran langsung resistansi pembumiannya dilokasi yang bersangkutan. Apabila digunakan elektroda pembumian jenis batang yang ditanam pada kedalaman L_r , maka besar resistivitas tanah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan : (IEEE std 80, 1986:54)

$$\rho = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (2-16)$$

dengan,

ρ : tahanan jenis tanah (ohm-m)

L_r : panjang elektroda rod (m)

d : diameter elektroda rod (m)

R : resistansi pembumian (ohm)

2.9. Regresi Berpangkat

Regresi berpangkat digunakan untuk menentukan fungsi berpangkat yang paling sesuai dengan kumpulan titik data (x_n, y_n) yang diketahui. Fungsi berpangkat diberikan dalam bentuk :(Ferianto Raharjo, 2009)

$$y = a \cdot x^b \quad (2-17)$$

atau :

$$g(x) = a \cdot x^b \quad (2-18)$$

Dengan a dan b sebagai konstanta, persamaan tersebut dapat dilinierkan dengan menggunakan fungsi logaritma sebagai berikut :

$$\log y = \log a \cdot x^b$$

Sehingga diperoleh,

$$\log y = \log a + b \cdot \log x$$

Dilakukan transformasi berikut :

$$p = \log y ; B = b$$

$$A = \log a ; q = \log x$$

Sehingga persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk :

$$p = A + B \cdot q \quad (2-19)$$

Dengan memasukkan nilai rata-rata dari y, p , dan q dengan persamaan :

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$$

$$\bar{p} = \frac{\sum p}{n}$$

$$\bar{q} = \frac{\sum q}{n}$$

Dengan, n : jumlah data, maka nilai A dan B dapat dihitung dengan persamaan :

$$B = \frac{n \sum q_1 p_1 - \sum q_1 \cdot \sum p_1}{n \sum q_1^2 - (\sum q_1)^2} \quad (2-20)$$

$$A = \bar{p} - B \cdot \bar{q} \quad (2-21)$$

Dengan menggunakan persamaan (2-20) dan (2-21) untuk menghitung koefisien a dan b, maka fungsi g(x) dapat diperoleh.

Untuk mengetahui derajat kesesuaian dari persamaan yang diperoleh, dihitung nilai koefisien korelasi dengan persamaan :

$$R = \sqrt{\frac{D_t^2 - D^2}{D_t^2}} \quad (2-22)$$

dengan, jumlah kuadrat total sebagai berikut :

$$D_t^2 = \sum_{i=1}^n \{y_1 - \bar{y}\}^2 \quad (2-23)$$

Jumlah kuadrat dari kesalahan dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$D^2 = \sum_{i=1}^n \{y_1 - g(x_1)\}^2 \quad (2-24)$$

2.10. Regresi Eksponensial

Regresi eksponensial digunakan untuk menentukan fungsi eksponensial yang paling sesuai dengan kumpulan titik data (x_n, y_n) yang diketahui. Fungsi eksponensial diberikan dalam bentuk :

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} \quad (2-25)$$

atau :

$$g(x) = a \cdot e^{b \cdot x} \quad (2-26)$$

Dengan a dan b sebagai konstanta, persamaan tersebut dapat dilinierkan dengan menggunakan logaritma natural sebagai berikut :

$$\ln y = \ln a \cdot e^{b \cdot x}$$

Sehingga diperoleh,

$$\ln y = \ln a + b \cdot x \ln e$$

Karena $\ln e = 1$, maka :

$$\ln y = \ln a + b \cdot x$$

Dilakukan transformasi berikut :

$$p = \ln y ; B = b$$

$$A = \ln a ; q = x$$

Sehingga persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk :

$$p = A + B \cdot q \quad (2-27)$$

Dengan memasukkan nilai rata-rata dari y, p, dan q dengan persamaan :

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$$

$$\bar{p} = \frac{\sum p}{n}$$

$$\bar{q} = \frac{\sum q}{n}$$

Dengan, n : jumlah data, maka nilai A dan B dapat dihitung dengan persamaan :

$$B = \frac{n \sum q_1 \cdot p_1 - \sum q_1 \cdot \sum p_1}{n \sum q_1^2 - (\sum q_1)^2} \quad (2-28)$$

$$A = \bar{p} - B \cdot \bar{q} \quad (2-29)$$

Dengan menggunakan persamaan (2-28) dan (2-29) untuk menghitung koefisien a dan b, maka fungsi $g(x)$ dapat diperoleh.

Untuk mengetahui derajat kesesuaian dari persamaan yang diperoleh, dihitung nilai koefisien korelasi dengan persamaan :

$$R = \sqrt{\frac{D_t^2 - D^2}{D_t^2}} \quad (2-30)$$

dengan, jumlah kuadrat total sebagai berikut :

$$D_t^2 = \sum_{i=1}^n \{y_1 - \bar{y}\}^2 \quad (2-31)$$

Jumlah kuadrat dari kesalahan dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$D^2 = \sum_{i=1}^n \{y_1 - g(x_1)\}^2 \quad (2-32)$$

2.11. Regresi Logaritma

Regresi logaritma digunakan untuk menentukan fungsi logaritma yang paling sesuai dengan kumpulan titik data (x_n, y_n) yang diketahui. Fungsi logaritma diberikan dalam bentuk :

$$y = a + b \ln x \quad (2-33)$$

atau :

$$g(x) = a + b \ln x \quad (2-34)$$

Dilakukan transformasi berikut:

$$p = y ; B = b$$

$$A = a ; q = \ln x$$

Sehingga persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk :

$$p = A + B \cdot q \quad (2-35)$$

Dengan memasukkan nilai rata-rata dari p dan q dengan persamaan :

$$\bar{p} = \frac{\sum p}{n}$$

$$\bar{q} = \frac{\sum q}{n}$$

dengan, n : jumlah data, maka nilai A dan B dapat dihitung dengan persamaan :

$$B = \frac{n \sum q_1 \cdot p_1 - \sum q_1 \cdot \sum p_1}{n \sum q_1^2 - (\sum q_1)^2} \quad (2-36)$$

$$A = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_1 - \sum_{i=1}^n B \ln x_1) \quad (2-37)$$

Dengan menggunakan persamaan (2-36) dan (2-37) untuk menghitung koefisien a dan b, maka fungsi $g(x)$ dapat diperoleh.

Untuk mengetahui derajat kesesuaian dari persamaan yang diperoleh, dihitung nilai koefisien korelasi dengan persamaan :

$$R = \sqrt{\frac{D_t^2 - D^2}{D_t^2}} \quad (2-38)$$

dengan, jumlah kuadrat total sebagai berikut :

$$D_t^2 = \sum_{i=1}^n \{y_1 - \bar{y}\}^2 \quad (2-39)$$

Jumlah kuadrat dari kesalahan dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$D^2 = \sum_{i=1}^n \{y_1 - g(x_1)\}^2 \quad (2-40)$$

