

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Yudistiro Y. (2008) dalam penelitiannya melakukan studi mengenai pemanfaatan arang kayu untuk memperkecil nilai resistansi pembumian. Dan hasil penelitiannya bahwa posisi arang kayu yang diletakkan konsentris bersama elektroda batang dapat menurunkan nilai resistansi pembumian hingga 33% dan semakin besar volume arang kayu yang ditambahkan dalam suatu medium tanah dapat memperkecil nilai resistansi pembumian.

Romi S.A (2006) dalam penelitiannya melakukan studi tentang pengaruh konfigurasi penanaman elektroda batang terhadap resistansi pembumian, dan hasil studinya membuah kesimpulan bahwa nilai resistansi pembumian dipengaruhi oleh konfigurasi penanaman batang elektroda baik segaris, persegi panjang maupun bujur sangkar, akan tetapi penambahan jumlah batang elektroda, jarak dan kedalaman penanaman batang elektroda menghasilkan nilai pembumian yang signifikan.

B. Anggoro, N.I Sinisuka, P.M. Pakpahan (2006), melakukan penelitian mengenai karakteristik resistivitas dan permitivitas tanah terhadap perubahan frekuensi. Pengujian resistivitas dan permitivitas tanah dengan arus bolak-balik, dan menghasilkan kesimpulan bahwa harga resistivitas dan permitivitas tanah berubah terhadap frekuensi arus yang diinjeksikan, harga resistivitas dan permitivitas tanah cenderung menurun dengan naiknya frekuensi, fungsi penurunannya tergantung dari kandungan mineral tanahnya, penambahan air dari 2,5% s/d 15% akan efektif menurunkan harga resistivitasnya bila kandungan air telah mencapai 7,5% ke atas untuk permitivitas tidak berpengaruh banyak. Hal ini terjadi karena kandungan clay sangat sedikit dan untuk sistem pembumian yang akan digunakan pada frekuensi tinggi perubahan permitivitas tanah tidak boleh diabaikan.

## 2.2 Sifat Kimia Arang Kayu

Arang yaitu residu hitam berisi karbon tidak murni yang dihasilkan dengan jalan menghilangkan kandungan air dan komponen volatil dari hewan atau tumbuhan, terutama dengan jalan memanaskan kayu (tanpa oksigen). Arang kayu adalah arang yang berasal dari kayu yang terbakar, kayu yang telah terbakar umumnya memiliki kadar air (7,31%), zat terbang (11,1%), kadar abu (5,4%), fixed C (83,89%), nilai kalor (6601 kal/gram) [Kresno Dwi,2005]. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1

**Tabel 2.1 Sifat-sifat kimia arang kayu**

pH (H <sub>2</sub> O)	8
pH (KCl)	8
C-Organik, %	55
N-Kjeldahl, %	0.1
C/N	131
P Potensial (HCl 25%, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), ppm	290.6
K Potensial (HCl 25%, K <sub>2</sub> O), mg/100 g	18
P-tersedia (Bray, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), ppm	69
K-tersedia (Morgan, K <sub>2</sub> O), ppm	133
Ca (1 N NH <sub>4</sub> Oac, pH 7.0 ekstraksi), me/100 g	28
Mg (1 N NH <sub>4</sub> Oac, pH 7.0 ekstraksi), me/100 g	8
K (1 N NH <sub>4</sub> Oac, pH 7.0 ekstraksi), me/100 g	17
Na (1 N NH <sub>4</sub> Oac, pH 7.0 ekstraksi), me/100 g	2
Total (1 N NH <sub>4</sub> Oac, pH 7.0 ekstraksi), me/100 g	55
KTk (1 N NH <sub>4</sub> Oac, pH 7.0 ekstraksi), me/100 g	19
Kejenuhan Basa, %	> 100
KCl 1 N, Al <sup>3+</sup> , me/100 g	0
KCl 1 N, H <sup>+</sup> , me/100 g	0

Sumber: Haris Iskandar, 2005: 37

## 2.3 Resistivitas dan Resistansi Arang Kayu

Arang kayu memiliki sifat-sifat listrik yaitu resistivitas. Resistivitas adalah salah satu faktor yang menentukan resistansi suatu bahan. Studi resistivitas dapat memberi informasi bermanfaat mengenai sifat alami arang kayu. Metode *survey* resistivitas mempunyai arti penting yang layak dipertimbangkan dan telah menjadi subyek

sejumlah penelitian. Untuk mengukur resistivitas arang kayu dapat dilakukan dengan menggunakan Ohmmeter karena nilai resistivitas arang kayu sebanding dengan nilai resistansinya maka dilakukan perhitungan dari hasil pengukuran, dengan Persamaan (2-1) [G.F. Tagg, 1964: 16]:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \text{ ohm} \quad (2-1)$$

$$\rho = \frac{A \cdot R}{l} \quad (2-2)$$

$$\rho = \frac{\pi r^2 \cdot R}{l} \text{ ohm-cm}$$

dengan :

R = nilai resistansi arang kayu hasil pengukuran (ohm)

l = tinggi arang kayu yang terisi dalam pipa (cm)

A = luas penampang pipa (cm<sup>2</sup>)

r = jari-jari pipa (cm)

ρ = nilai resistivitas arang kayu (ohm-cm)

Resistivitas arang kayu sangat dipengaruhi oleh kerapatan partikel arangnya serta kadar air yang terkandung dalam arang kayu tersebut. Kerapatan adalah suatu besaran turunan dalam fisika yang secara umum lebih dikenal massa jenis. Maka dalam penelitian perlu juga diketahui kerapatan dari partikel arang kayu yang digunakan dalam penelitian. Dan kerapatan arang kayu dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-3) [Gaguk A, 2004: 1]:

$$K = \frac{m}{V} \quad (2-3)$$

dengan:

K = kerapatan arang kayu (gram/cm<sup>3</sup>)

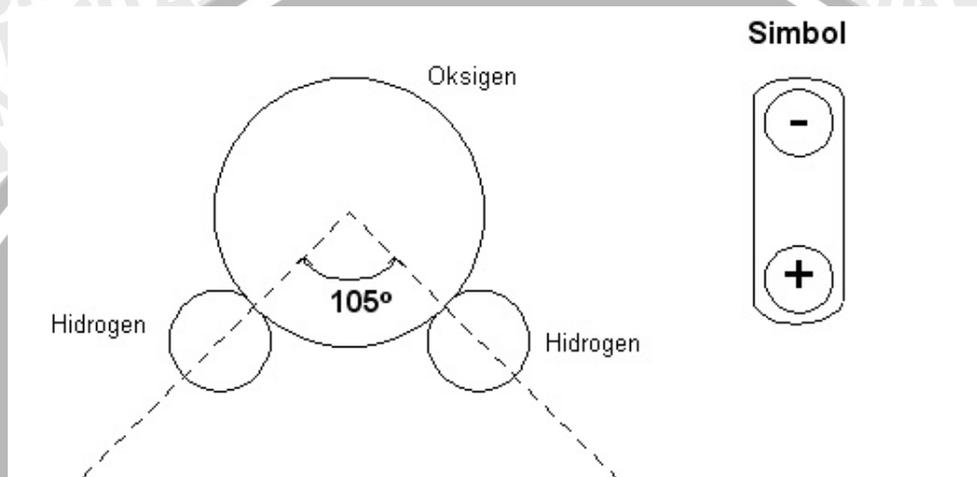
m = massa arang kayu (gram)

V = volume arang kayu dalam pipa (cm<sup>3</sup>)

## 2.4 Mekanisme Interaksi Antara Air Dengan Arang Kayu

Pada umumnya partikel arang kayu adalah karbon aktif yang memiliki bentuk *amorf* dan mempunyai luas permukaan yang besar (300-2000 m<sup>2</sup>/g) [Child, 1974]. Besarnya luas permukaan ini menunjukkan bahwa struktur pori internalnya juga besar, akibatnya karbon aktif mempunyai kemampuan untuk menyerap gas, uap dan air [Mark,

1972]. Arang kayu berbentuk *amorf* terdiri dari pelat-pelat datar, disusun oleh atom-atom C yang terikat secara kovalen dalam suatu sisi hexagonal [Stenzel, 1993]. Berdasarkan karakteristik arang kayu, arang kayu mempunyai muatan negatif pada permukaannya. Dalam suatu kristal yang ideal, muatan-muatan negatif dan positif seimbang. Akan tetapi, akibat substitusi isomorf dan kontinuitas perpecahan susunannya, terjadi muatan negatif pada permukaan partikel arangnya. Untuk mengimbangi muatan negatif tersebut, partikel arang menarik ion positif (kation) yang ada di dalam pori air.



Gambar 2.1 Sifat dipolar air

Sumber: Hardiyatmo, 1992: 19

Tabel 2.2 Sifat-sifat kimia air

nama umum	Air
Nama lain	larutan, dihidrogenmonoksida, hidrogen hidroksida
rumus molekul	H <sub>2</sub> O
InChI	InChI=1/H2O/h1H2
massa molar	18.0153 g/mol
Kerapatan dan wujud	0.998 g/cm <sup>3</sup> (liquid at 20 °C) 0.92 g/cm <sup>3</sup> (solid)
titik beku	0 °C (273.15 K) (32 °F)
titik didih	100 °C (373.15 K) (212 °F)
kapasitas panas spesifik	4.184 J/(g·K) (liquid at 20 °C)
reaksi kimia	2H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> → 2OH <sup>-</sup> + H <sub>2</sub>

Sumber: [www.google.com/water\\_chemical\\_character.htm](http://www.google.com/water_chemical_character.htm), diakses tanggal 01/03/2008

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 dan Tabel 2.2, bahwa molekul air tersusun dari dua atom hidrogen dan satu atom oksigen. Atom hidrogen pada molekul air tidak tersusun secara simetris di sekeliling atom oksigen, melainkan membentuk sudut ikatan sebesar  $105^\circ$ . Akibat dari sifat ini, molekul air berkelakuan seperti batang-batang kecil yang mempunyai muatan positif di satu sisi dan muatan negatif disisi yang lain (dipolar). Dalam penentuan kadar air dapat dilakukan dengan asumsi bahwa dalam karbon aktif hanya air yang merupakan senyawa volatil. Berdasarkan Standar Industri Indonesia (SII), karbon aktif yang baik memiliki kadar air maksimal 20% [Anonim, 1984]

Kadar air dalam arang kayu memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap resistansinya, karena dapat memperkecil nilai resistansinya. Untuk memperkecil resistansi arang kayu diperlukan pengaturan komposisi air tertentu untuk mendapatkan resistansi yang diharapkan pada arang kayu, maka untuk pengaturan kadar air dalam arang kayu tersebut dapat menggunakan Persamaan (2-4) [Indranada, 1986: 34]:

$$KA_a = \frac{(m_{ab} - m_{ak})}{m_{ak}} \times 100\% \quad (2-4)$$

$$m_{ab} = \left( \frac{KA_a \times m_{ak}}{100\%} \right) + m_{ak} \quad (2-5)$$

dengan:

$KA_a$  = kadar air dalam arang (%)

$m_{ab}$  = massa arang yang diukur pada keadaan basah (gr)

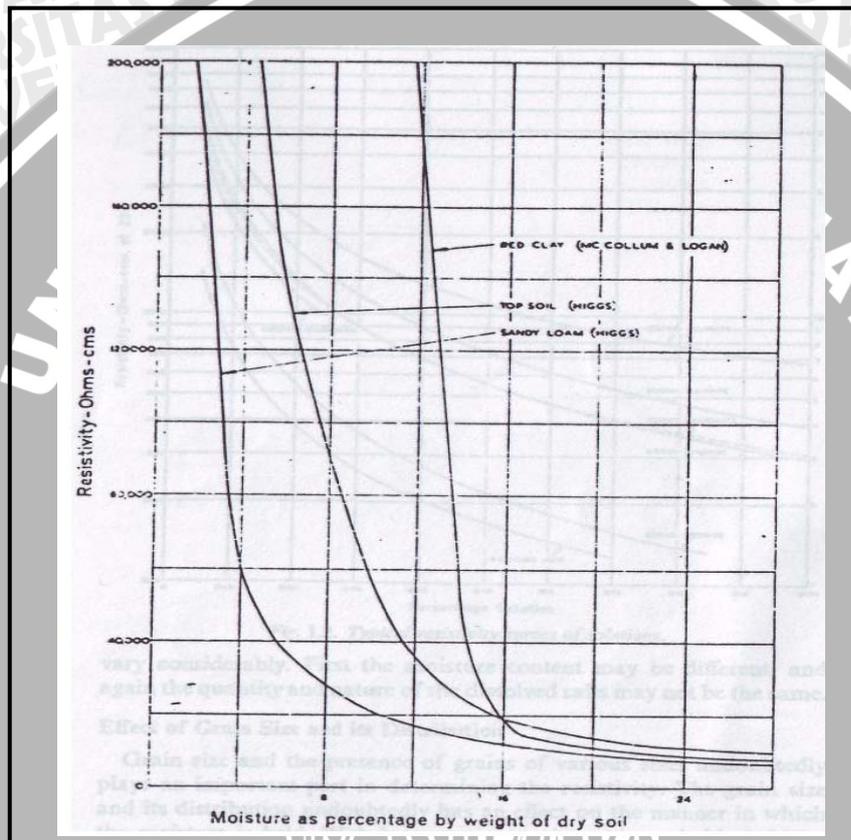
$m_{ak}$  = massa arang yang diukur pada keadaan kering (gr)

## 2.5 Tanah Sebagai Konduktor

Dalam perkembangan sistem tenaga listrik, tanah digunakan sebagai konduktor listrik. Pada prakteknya tanah digunakan sebagai konduktor baik, meskipun tanah memiliki banyak kelemahan jika digunakan sebagai konduktor. Karena dimensi lintasan arus yang melalui tanah sangat besar, resistansi beberapa lintasan diabaikan. Bentuk elektroda yang digunakan akan sangat menentukan besarnya resistansi tanah yang dilewati arus keluar dan masuk tanah.

Sifat listrik tanah sangat penting dan menarik khususnya resistansi spesifik atau resistivitas. Resistivitas merupakan suatu faktor yang menentukan resistansi elektroda pembumian. Sebagian besar tanah dan batu ketika sangat kering bukan merupakan

konduktor listrik. Namun jika tanah dan batu mengandung mineral tertentu, maka menjadi bersifat konduktor listrik karena kandungan metaliknya. Pasir dan batu memiliki resistivitas yang tinggi, sehingga bukan merupakan suatu konduktor yang baik. Ketika mengandung air, resistivitasnya akan sangat turun sehingga tanah bersifat konduktor, meskipun merupakan konduktor yang buruk bila dibandingkan dengan bahan metal. Sebagai contoh, resistivitas baja sepuhan tembaga adalah 1,6 mikrohm-cm, sedangkan tanah pada umumnya mempunyai resistivitas sekitar 10000 ohm-cm.



**Gambar 2.2** Grafik fungsi resistivitas terhadap kadar air dalam tanah

Sumber: G.F. Tagg, 1964: 5

Gambar 2.2 menunjukkan hubungan resistivitas tanah dengan kadar air yang dikandungnya untuk beberapa jenis tanah. Pada persentase air yang besar, kelembaban tinggi, maka resistivitasnya kecil. Dari gambar dapat dilihat bahwa resistivitas akan turun dengan cepat ketika terjadi penambahan kelembaban/kadar air. Dan untuk mengkondisikan tanah menjadi lebih konduktif perlu dilakukan *treatment* khusus terhadap tanah, *treatment* khusus tersebut bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat kimia dasar dari tanah [Roy, 1997]. Resistivitas tanah ditentukan oleh kadar air dalam tanah serta perlakuan terhadap tanah.

## 2.6 Jenis Tanah

Jenis tanah sangat menentukan resistivitas tanah tersebut. Terkait dengan pembumian tanah dibagi dalam beberapa jenis. Tanah liat dapat terdiri dari beberapa jenis. Karena alasan ini sungguh mustahil untuk menyatakan bahwa tanah liat, atau tanah lain sebetulnya mempunyai suatu resistivitas yang sangat tinggi. Lagipula jenis tanah yang sama terdapat dalam berbagai tempat berbeda dari tempat lain.

**Tabel 2.3 Nilai resistivitas beberapa jenis tanah**

Jenis Tanah	Resistivitas dalam (ohm-cm)
Tanah liat, tanah kebun, dll	500 – 5.000
Tanah liat	800 – 5.000
Campuran tanah liat, pasir dan kerikil	4.000 – 25.000
Pasir dan kerikil	6.000 – 10.000
Batu tulis, pasir berbatu, dll	1.000 – 50.000
Batu karang	20.000 – 1.000.000

Sumber: G.F. Tagg, 1964: 4

Nilai resistivitas dalam Tabel 2.3 adalah suatu perkiraan untuk resistivitas yang diharapkan. Sejumlah peneliti dari waktu ke waktu mengukur resistivitas berbagai jenis tanah baik melalui pengambilan contoh dan mengukurnya dalam piranti khusus maupun dengan pengukuran yang tak terpengaruh massa tanah. Keduanya bukan pengukuran gampang tetapi lebih memungkinkan untuk memberi hasil akurat. Sangat sulit untuk memastikan bahwa contoh yang diambil dari tanah dalam kondisi yang sama ketika diukur sebagaimana ia ditempatkan.

## 2.7 Resistansi Pembumian

Resistansi dalam sistem pembumian adalah komposisi dari [IEEE Green Book std 142-1991: 171]:

1. Resistansi elektroda batang
2. Resistansi kontak antara permukaan elektroda batang dan tanah di sekitarnya
3. Resistansi bagian tanah di sekitar elektroda batang pembumian

Umumnya resistansi elektroda batang dan resistansi kontak nilainya kecil dan dapat diabaikan dengan resistansi bagian tanah di sekitar elektroda pembumian [katalog, 1986]. Hal tersebut dapat diabaikan apabila elektroda batang pembumian bebas dari minyak maupun cat dan kontak antara tanah dan elektroda pembumian adalah sempurna

(tidak ada rongga udara). Dengan demikian resistansi yang paling menentukan harga resistansi sistem pembumian adalah resistivitas tanah itu sendiri. Komponen yang mempengaruhi resistivitas tanah adalah jenis tanah, komposisi kimia yang terkandung di dalam tanah, konsentrasi kimia garam yang terkandung di dalam tanah, kadar air yang terkandung dalam tanah, temperatur tanah, ukuran butiran material serta distribusinya, kepadatan dan tekanan tanah [G.F. Tagg, 1964: 4].

## 2.8 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 pembumiannya 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.

Agar sistem pembumian dapat bekerja efektif, maka harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut :

1. Membuat jalur impedansi rendah ke tanah untuk pengamanan personil maupun peralatan.

2. Dapat menyebarkan arus gangguan secara berulang akibat surja hubung (*surge currents*).
3. Menggunakan elektroda yang tahan korosi terhadap pengaruh kimia tanah sehingga menjamin kontinuitas pengamanan sepanjang umur objek yang diamankan.
4. Menggunakan bahan yang tahan terhadap pengaruh mekanis.

## 2.9 Jenis Elektroda Pbumian

Jenis - jenis elektroda pbumian dan penggunaannya :

- 1) Pbumian batang vertikal (*grounding rod*)

*Grounding rod* adalah pbumian yang dilakukan dengan cara menanam batang elektroda pbumian tegak lurus dengan permukaan tanah.

- 2) Pbumian kisi-kisi (*grounding grid*)

*Grounding grid* adalah pbumian yang dilakukan dengan cara menanam batang elektroda pbumian sejajar dengan permukaan tanah dan elektroda pbumian tersebut dihubungkan satu dengan yang lain sehingga berbentuk mesh / jaring.

Kegunaan elektroda pbumian dalam sistem tenaga misalnya untuk :

- Pbumian peralatan
- Pbumian titik netral, dll.

## 2.10 Sistem Pbumian Menggunakan Elektroda Batang (*Rod*)

Sistem pbumian memiliki tujuan untuk mendapatkan resistansi yang rendah sehingga memungkinkan arus gangguan dengan cepat terdistribusi ke tanah. Elektroda pbumian yang digunakan untuk melewatkan arus gangguan ke tanah adalah elektroda pbumian jenis batang. Elektroda batang adalah elektroda yang terbuat dari tembaga, besi baja profil atau pipa yang dipancangkan kedalam bumi. Dalam penggunaan elektroda batang sangat dipengaruhi oleh ukuran, dimensi serta bahan pembuatan elektroda batang tersebut, karena pada dasarnya pbumian dengan elektroda batang perlu memperhatikan panjang dan ukuran elektrodanya agar dalam melakukan instalasi pbumian bisa diperoleh hasil dan nilai yang baik, meskipun pengaruh ukuran diameter terhadap resistansi pbumiannya adalah kecil yang hanya berpengaruh sekitar 10% [Roy, 1997].

Dimensi standar elektroda batang yang umum dipakai tersebut dapat dilihat di dalam Tabel 2.4.

**Tabel 2.4 Dimensi standar elektroda batang**

No.	Elektroda Batang				
	Diameter (inchi)	Panjang (ft)	Diameter (mm)	Panjang (m)	Ukuran Klem* (mm <sup>2</sup> )
1	3/8	5-40	9,53	1,5-12,2	6-10
2	1/2		12,7		6-16
3	5/8		15,88		6-16
4	3/4		19,05		25-50
5	1		25,4		25-50

Sumber: IEEE Green book Std 142-1991: 184 (\* Sesuai SPLN 102, 1993: 9)

Pada umumnya elektroda batang menggunakan silinder yang terbuat dari tembaga murni, batang tembaga telanjang dan berlapis (*copper-clad steel*), batang besi tahan karat (*stainless rod*), kawat tembaga yang dimasukkan ke dalam batang pipa yang digalvanisasi dan dapat berupa baja yang sudah disepuh oleh tembaga.

**Tabel 2.5 Luas penampang minimum elektroda batang pembumian standar berdasarkan jenis bahan**

Jenis elektroda	Bahan		
	Baja berlapis seng dengan proses pemanasan	Baja berlapis tembaga	Tembaga
Elektroda batang	<i>Pipa baja berdiameter 1 inchi:</i>  Baja profil: L 65x65x7 U 6 1/2 T 6 X 50x3 atau batang profil lain yang setara	<i>Baja bulat:</i>  Berdiameter 15 mm dilapisi tembaga setebal 2,5 mm	<i>Pipa tembaga:</i>  Luas penampang: 50 mm <sup>2</sup> Tebal : 2 mm Hantaran pilin: ( <i>bukan kawat halus</i> ) Luas penampangnya: 35 mm <sup>2</sup>

Sumber: Pedoman Pengawasan Instalasi Listrik (Disnaker-RI), 1987: 18

Kalau tanahnya sangat korosif sebaiknya digunakan ukuran-ukuran minimum 1,5x ukuran yang diberikan pada Tabel 2.5. Kalau elektroda yang dimaksudnya untuk mengatur gradient tegangan, luas penampang minimum yang boleh digunakan adalah sebagai berikut [DISNAKER RI, 1987: 18]:

1. Untuk baja berlapis tembaga : minimum 16 mm<sup>2</sup>
2. Untuk tembaga : minimum 10 mm<sup>2</sup>

Untuk memancangkan elektroda-elektroda ini sering digunakan *palu lantak*. Elektroda-elektroda tersebut 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 mengolahnya 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 4 meter. Elektroda-elektroda itu tidak boleh berada dalam corong tegangan dari elektroda di sampingnya. Pembedaan dengan menggunakan elektroda batang juga disebut *pembumian dalam*.

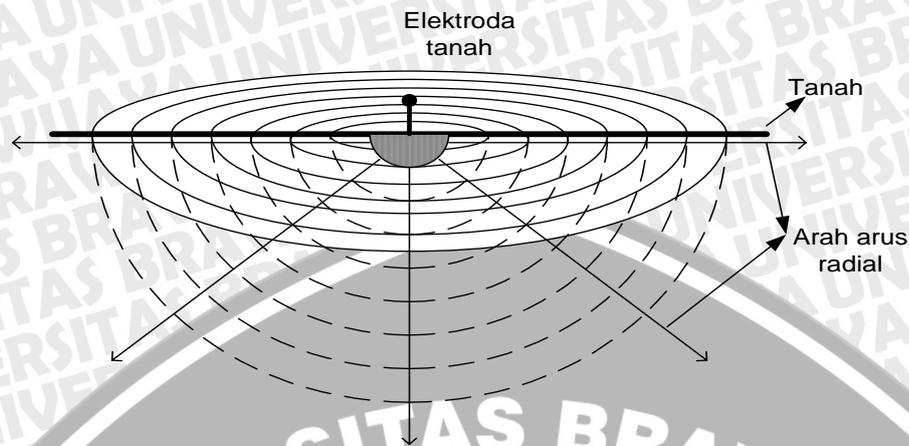
Adapun beberapa hal penting yang perlu diperhatikan dalam pemilihan elektroda batang dalam suatu sistem pembumian antara lain:

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

### **2.11 Penanaman Satu Elektroda Batang Pembumian Tegak Lurus Dengan Permukaan Tanah.**

Sebuah sistem pembumian membentuk elektroda tanah yang umumnya dimodelkan sebagai sebuah setengah lingkaran, setengah ellips atau setengah tabung dengan alas berupa setengah bola. Elektroda ini digambarkan sebagai konduktor yang terdiri dari lapisan berupa sel-sel tanah yang tebalnya sama seperti yang dilihat pada

Gambar 2.3, berupa penanaman satu elektroda batang pembumian tegak lurus dengan permukaan tanah.

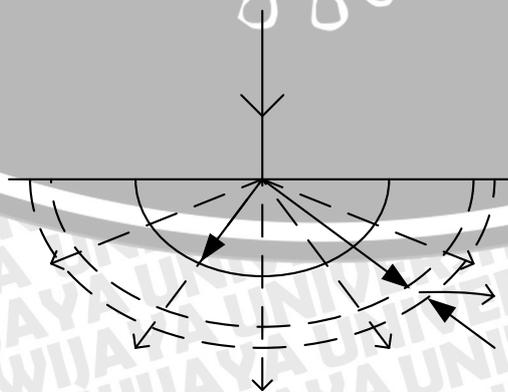


**Gambar 2.3 Sel-sel tanah sebagai elektroda pembumian**

Sumber: Pabla, 1988: 218

Arus yang mengalir dari pembumian tersebut akan melintasi sel-sel ini ke semua arah. Sel tanah yang terdekat dengan batang pembumian mempunyai permukaan paling kecil sehingga memberikan resistansi paling besar. Bila jarak dari elektroda bertambah, maka luasan ini juga akan membesar. Pada beberapa titik yang menentukan jarak tertentu, penambahan sel secara signifikan tidak menambah resistansi tanah sekitar elektroda batang pembumian. Hal ini diketahui sebagai daerah resistansi efektif dan jarak ini ditentukan oleh kedalaman penanaman dan diameter elektroda batang pembumian yang dipakai.

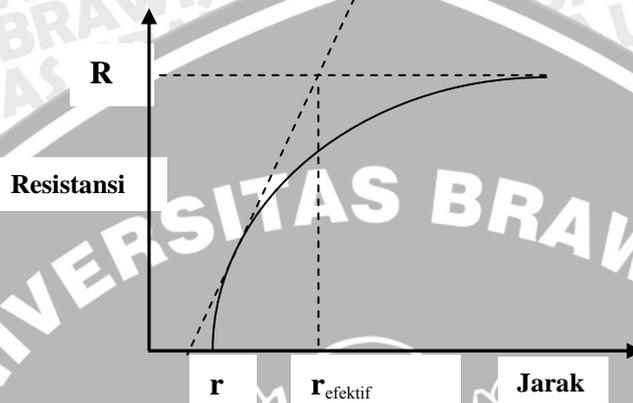
Agar pengukuran sifat resistansi elektroda pembumian sederhana maka elektroda tanah dianggap berbentuk *hemisphere* (setengah bola) seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4



**Gambar 2.4 Distribusi arus didalam tanah**

Sumber: G.F Tagg, 1964: 90

Pada Gambar 2.4 mengandaikan arus I mengalir ke tanah melalui elektroda hemisphere. Arus I mengalir ke semua arah dan jika elektroda kembali sepanjang jalur yang jauh, maka arus akan mengalir secara seragam pada semua arah. Semua permukaannya tersusun secara seri. Jarak dari elektroda bertambah sehingga elemennya juga bertambah, sedangkan nilai resistansinya perlahan berkurang. Kurva resistansi terhadap jarak diperlihatkan pada Gambar 2.5



**Gambar 2.5 Grafik fungsi resistansi terhadap jarak**

Sumber: G.F Tagg, 1964: 91

Jika sel individual pada radius  $x$ , mempunyai lapisan tipis setebal  $dx$ , mempunyai resistansi  $dR$  yang dinyatakan:

$$dR = \frac{\rho dx}{2\pi x^2} \tag{2-6}$$

Integrasi dari  $r$  menuju titik  $r_1$  menghasilkan :

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \tag{2-7}$$

Bila  $r_1$  berada dijauh tak berhingga ( $r_1 = \infty$ ), maka rumusan di atas menjadi :

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \tag{2-8}$$

Yang menyatakan resistansi efektif sistem pembumian.

Karena kapasitansi elektroda bola  $C$  yang berjari-jari  $r$  di udara adalah sama dengan  $r$ , maka resistansi efektif tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$R = \frac{\rho}{2\pi C} \tag{2-9}$$

dengan

$R$  = tahanan satu batang elektroda (ohm)

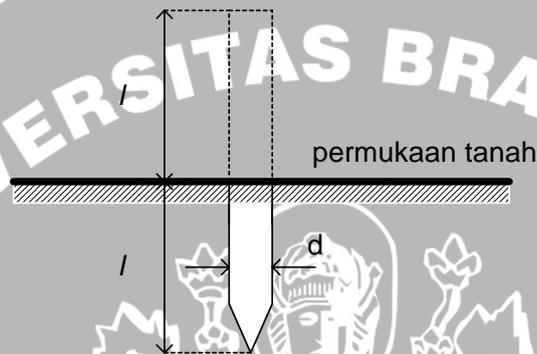
$\rho$  = resistivitas tanah (ohm-cm)

$C$  = kapasitansi elektroda (farad)

Pendekatan yang paling bagus diperoleh dengan menganggap elektroda sebagai setengah putaran ellipsoida dimana axis mayor lebih besar dibandingkan axis minor, Maka dapat dinyatakan muatan sebuah ellipsoid adalah [G.F Tagg, 1964: 94]:

$$C = \frac{a}{2 \log_e \frac{2a}{b}} \quad (2-10)$$

Dimana a adalah panjang axis mayor dan b adalah panjang axis minor dari ellips



Gambar 2.6 Elektroda batang dan bayangannya

Sumber: G.F Tagg, 1964: 94

Pada Gambar 2.6 menunjukkan penanaman elektroda batang dengan bayangannya.

Yang digunakan untuk mengetahui kapasitansi elektroda batang.

Jika Persamaan (2-5) diterapkan untuk elektroda batang, maka:

$$C = \frac{2l}{2 \log_e \frac{4l}{d}} = \frac{l}{\log_e \frac{4l}{d}} \quad (2-11)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2-11) ke Persamaan (2-9), maka besar resistansi dari suatu elektroda batang yang ditanam tegak lurus dengan tanah dapat ditentukan dengan Persamaan (2-12) [G.F Tagg, 1964:96]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \log_e \frac{4l}{d} \quad (2-12)$$

dengan

$R$  = tahanan satu batang elektroda (ohm)

$\rho$  = tahanan jenis elektroda batang (ohm-cm)

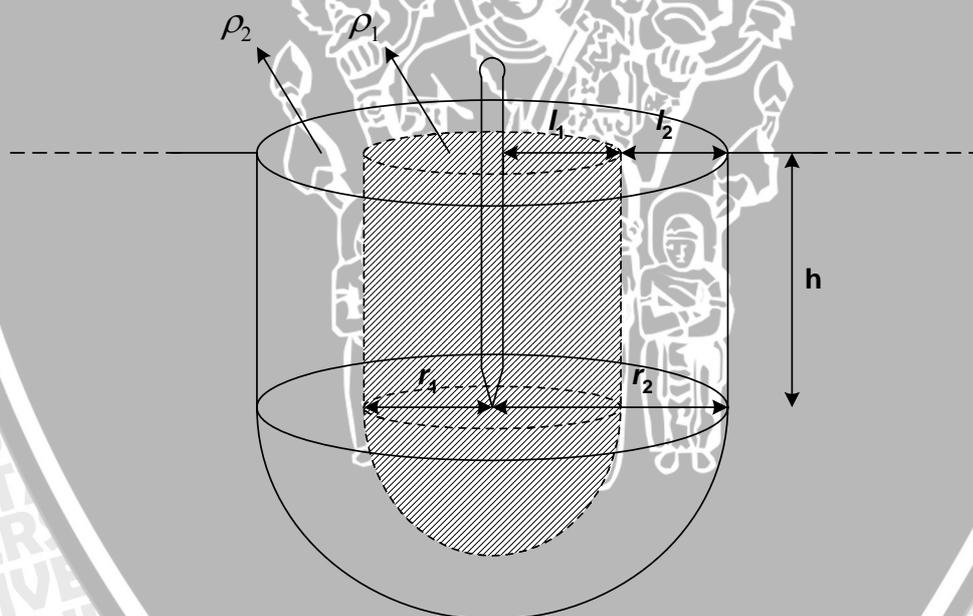
$l$  = panjang elektroda batang dalam tanah (cm)

$d$  = diameter konduktor pembumian (cm)

## 2.12 Pengaruh Ketidak Seragaman Lapisan Tanah Terhadap Nilai Resistansi Pembedaan

Kandungan mineral tanah akan sangat menentukan sifat-sifat kelistrikan dari tanah tersebut. Sifat kelistrikan itu menyangkut nilai resistivitas. Faktor luar tanah yang ikut menentukan harga resistivitas ( $\rho$ ) adalah campuran bahan lain seperti air, garam, larutan kimia, arang dan lain-lain. Adanya perbedaan unsur kimia penyusun lapisan tanah mengakibatkan ketidak seragaman lapisan tanah [Roy, 1997]. Akibat dari ketidak seragaman lapisan tanah terhadap nilai resistansi tanah adalah perbedaan nilai resistansi tanah dari setiap lapisan tanah. Sehingga tidak mengherankan, apabila terkadang nilai resistivitas tanah bagian dalam yang seharusnya semakin kecil karena semakin banyak mengandung air, menjadi sama bahkan menjadi lebih besar jika dibandingkan dengan nilai resistivitas tanah bagian atas.

Perbedaan nilai resistansi tanah pada setiap lapisan tanah dapat mempengaruhi nilai resistansi pembedaan. Analisis kuantitatif untuk pengaruh heterogenitas tanah ditunjukkan pada Persamaan (2-13) sampai (2-16) dengan mengacu pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Heterogenitas lapisan tanah

Sumber: Carpenter, 1997

Distribusi arus ke tanah adalah tegak lurus terhadap tanah, sehingga nilai resistansi tanah untuk setiap lapisan tanah yang heterogen dapat dirumuskan dengan Persamaan (2-13) dan (2-14)

$$R_1 = \frac{\rho_1 \cdot l_1}{A_1} = \frac{\rho_1 \cdot l_1}{(2\pi r_1 h + 2\pi r_1^2)} \quad (2-13)$$

$$R_2 = \frac{\rho_2 \cdot l_2}{A_2} = \frac{\rho_2 \cdot l_2}{(2\pi r_2 h + 2\pi r_2^2)} \quad (2-14)$$

Heterogenitas untuk setiap lapisan tanah jenis -n sesuai dengan Gambar 2.7 dapat dirumuskan dengan persamaan (2-15)

$$R_n = \frac{\rho_n \cdot l_n}{A_n} = \frac{\rho_n \cdot l_n}{(2\pi r_n h + 2\pi r_n^2)} \quad (2-15)$$

Sehingga nilai resistansi pembedaan dengan mengabaikan nilai resistansi elektroda batang dan resistansi kontak antara elektroda batang dengan tanah dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$R_e = R_1 + R_2 \dots\dots\dots + R_n \quad (2-16)$$

dengan

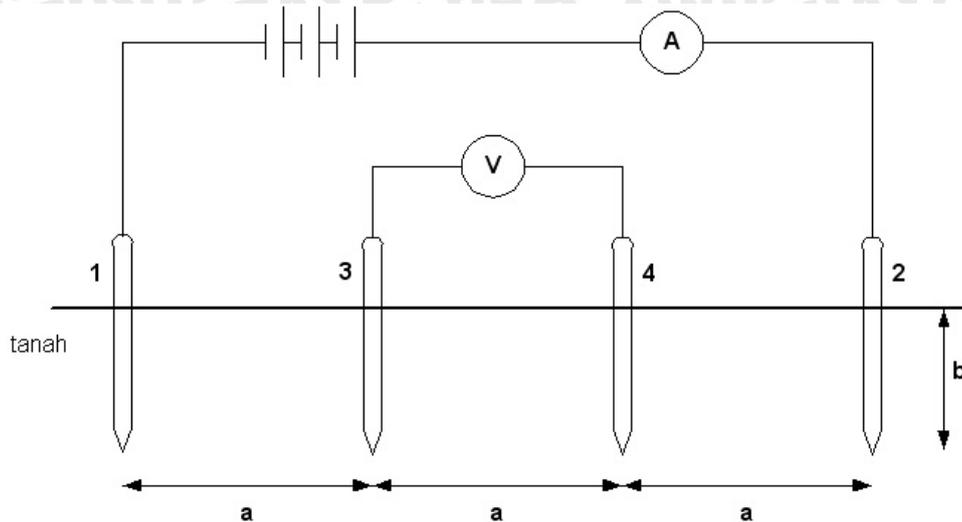
- Re = resistansi pembedaan (ohm)
- R = resistansi tanah (ohm)
- ρ = resistivitas tanah (ohm-cm)
- l = tebal lapisan tanah (cm)
- r = jari-jari lapisan tanah (cm)
- A = luas rata-rata permukaan lapisan tanah (cm<sup>2</sup>)
- h = kedalaman penanaman elektroda batang (cm)
- n = jenis tanah -n  
= 1,2,3.....dst.

## 2.13 Metode Pengukuran Resistivitas Dan Resistansi Tanah

### 2.13.1 Pengukuran Resistivitas Tanah

Resistivitas tanah dapat diketahui dengan menggunakan metode empat titik, yaitu menyusun empat buah elektroda batang pada satu garis dengan jarak yang sama antara elektroda batang yang satu dengan elektroda batang yang lainnya. Dengan syarat bahwa diameter dari elektroda batang yang dimasukkan ke tanah tidak boleh lebih dari 10 persen dari jarak antara elektroda, dan semua elektroda batang yang dimasukkan ke tanah harus memiliki kedalaman yang sama, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.8.





Gambar 2.8 Pengukuran resistivitas tanah dengan menggunakan metode empat titik

Sumber: T.S Hutauruk, 1987:142

Arus  $I$  dapat mengalir dan dapat terbaca pada Ampermeter karena adanya lebih dari satu buah elektroda batang yang dimasukkan ke tanah sehingga membentuk *loop* tertutup, arus masuk ke tanah melalui salah satu elektroda batang dan kembali melalui elektroda batang yang lain. Pengukuran resistivitas tanah dengan menggunakan metode empat titik tidak dipengaruhi oleh diameter dari elektroda batang dan komponen penghantarnya, tetapi sangat dipengaruhi oleh jarak antara elektroda batang yang dimasukkan ke tanah. Mengacu pada Gambar 2.8 maka dapat dihitung nilai efektif dari resistivitas tanah, yang ditunjukkan pada Persamaan (2-17) [G.F Tagg, 1964:14]:

$$\rho = \frac{4\pi a U}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2 + 4b^2)}} - \frac{2a}{\sqrt{(4a^2 + 4b^2)}}\right) I} = \frac{4\pi a U}{n I} \quad (2-17)$$

dengan

$a$  = jarak antara elektroda batang yang dimasukkan ke tanah (cm)

$b$  = kedalaman penanaman elektroda batang (cm)

$\rho$  = resistivitas tanah (ohm-cm)

$U$  = tegangan yang terukur pada Voltmeter (volt)

$I$  = arus yang terukur pada Amperemeter (ampere)

$n$  = memiliki nilai antara 1 sampai 2 tergantung oleh perbandingan  $b/a$

apabila  $b=a$ , maka  $n=1,187$ ;

$b=2a$ , maka  $n=1,038$ .

Dengan kasus yang sama apabila nilai  $a$  jauh lebih besar jika dibandingkan dengan  $b$ , maka nilai resistivitas tanah menjadi:

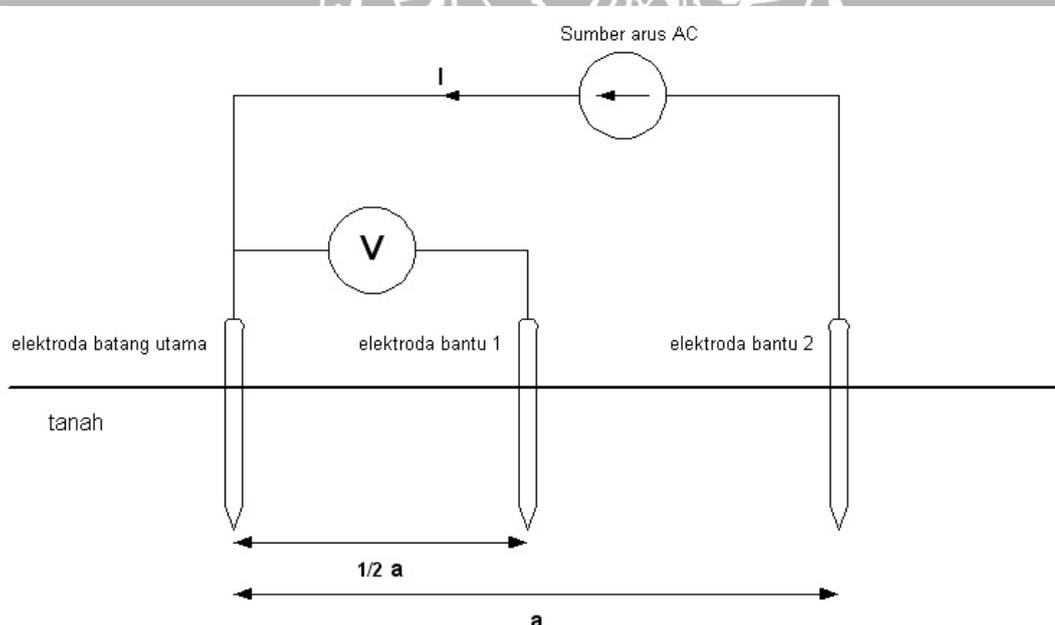
$$\rho = \frac{2\pi aU}{I} \quad (2-18)$$

Dan apabila nilai  $b$  jauh lebih besar jika dibandingkan dengan  $a$ , maka nilai resistivitas tanah menjadi:

$$\rho = \frac{4\pi aU}{I} \quad (2-19)$$

### 2.13.2 Pengukuran Resistansi Tanah

Untuk mengetahui besar resistansi tanah dapat menggunakan metode tiga titik, yaitu dengan memasang tiga buah elektroda batang yang terdiri satu buah elektroda batang utama dan dua buah elektroda batang bantu dengan jarak tertentu. Dengan memberikan sumber arus yang dipasang antara elektroda batang utama dengan elektroda batang bantu 2, serta memasang Voltmeter yang dipasang antara elektroda batang utama dengan elektroda batang bantu 1, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pengukuran resistansi tanah dengan menggunakan metode tiga titik

Sumber: T.S Hutauruk, 1987:144

$a$  adalah jarak antara elektroda batang utama dengan elektroda batang bantu 2, dan elektroda batang bantu 1 dimasukkan ke tanah dengan jarak minimal  $\frac{1}{2} a$  dari elektroda batang utama.

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 (2-20):

$$U = R \cdot I$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (2-20)$$

Dengan:

U = tegangan yang terukur oleh Voltmeter (volt)

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

R = resistansi tanah (ohm)

