

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sejarah Candi Badut**

Candi Badut merupakan peninggalan sejarah kerajaan Singosari yang terletak di kawasan Tidar, Kota Malang Jawa Timur. Kata Badut di sini berasal dari bahasa sansekerta “Bha-dyut” yang berarti sorot Bintang Canopus atau Sorot Agastya. Hal itu terlihat pada ruangan induk candi yang berisi sebuah pasangan arca tidak nyata dari Siwa dan Parwati dalam bentuk lingga dan yoni. Pada bagian dinding luar terdapat relung-relung yang berisi arca Mahakal dan Nadiswara. Pada relung utara terdapat arca Durga Mahesuramardhini. Relung timur terdapat arca Ganesha. Dan disebelah Selatan terdapat arca Agastya yakni Syiwa sebagai Mahaguru. Namun di antara semua arca itu hanya arca Durga Mahesuramardhini saja yang tersisa.

Candi ini ditemukan pada tahun 1921 dimana bentuknya pada saat itu hanya berupa gundukan bukit batu, reruntuhan dan tanah. Orang pertama yang memberitakan keberadaan Candi Badut adalah Maureen Brecher, seorang kontrolir bangsa Belanda yang bekerja di Malang. Candi Badut dibangun kembali pada tahun 1925-1927 di bawah pengawasan B. De Haan dari Jawatan Purbakala Hindia Belanda. Dari hasil penggalian yang dilakukan pada saat itu diketahui bahwa bangunan candi telah runtuh sama sekali, kecuali bagian kaki yang masih dapat dilihat susunannya.

Gaya arsitektur Candi Badut merupakan bentuk dan gaya kesenian yang berkembang pada abad ke VIII-X M, terutama candi Canggal yang terletak di daerah Muntilan Jawa Tengah. Bentuk bangunannya tambun, bahan bangunan terbuat dari batuan andesit, kaki Candi yang polos tanpa hiasan, motif kertas tempel pada dinding, pintu masuk diberi penampil, gawang pintu dan relung berhiaskan kalamakara yang menghiasi bagian atas pintu kepala kalanya tidak memakai rahang bawah, reliefnya naturalis. Dari beberapa kesamaan tersebut maka Candi badut dimasukkan sebagai salah satu candi berlanggam jawa tengah(masa abad VIII-X M) Denah Candi Badut berbentuk kosentris. Dahulunya Candi ini dikelilingi oleh tembok batu yang sekarang sudah menghilang

samasekali. Candi utama menghadap barat, dan di depannya terdapat tiga candi perwara yang sekarang hanya tinggal pondasinya saja. Candi Badut ini memiliki tiga bagian yaitu kaki candi, tubuh candi, dan atap candi. Pada tahun 1926 seluruh bagian kaki dan tubuh candi dapat dibangun kembali, kecuali bagian atapnya yang tidak dapat diketemukan kembali. Setelah kemerdekaan NKRI, pada tahun 1990-1993 dilaksanakan pemugaran lebih lanjut oleh Kanwil Dekdikbud dan Suaka Peninggalan Sejarah dan Purbakala Jawa Timur, melalui proyek Pelestarian/Pemanfaatan Peninggalan Sejarah dan Purbakala Jawa Timur, yang dilakukan secara bertahap (Anonymous, 2012<sup>3</sup>).

## 2.2 Kelistrikan Bumi

Bentuk arus dalam bumi berupa elektron, namun pada batuan sedimen yang bersaturasi dengan air, di laut, dan di atmosfer itu kebanyakan berupa ion. Derajat ionisasi di udara bervariasi bergantung pada waktu, elevasi dan latitude.

Awan ion (elektron) di udara dapat menimbulkan arus listrik apabila elektron bergerak relatif terhadap bumi. Dari arus tersebut akan menghasilkan medan magnet. Arus di bumi ini tidak dapat diukur secara langsung, melainkan ditentukan dari potensial gradien dan resistivitas dengan menggunakan hukum Ohm (Santoso, 2002).

Hukum Ohm merupakan persamaan dasar dalam kelistrikan, arus listrik searah dialirkan melalui suatu medium maka perbandingan antara beda potensial ( $\Delta V$ ) yang terjadi dengan arus ( $I$ ) yang diberikan adalah tetap, dan besarnya tetapan ini tergantung dari medium yang dilewati oleh arus tersebut. Tetapan ini disebut dengan hambatan listrik yang disimbolkan " $R$ ", dimana besarnya hambatan ( $R$ ) adalah :

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.1)$$

dimana:  $R$  = hambatan (ohm)

$\Delta V$  = beda potensial (volt)

$I$  = arus listrik (ampere)

## 2.2.1 Potensial listrik dalam medium homogen

Dalam melakukan interpretasi pengukuran pada metode geolistrik resistivitas ini biasanya dengan asumsi bahwa bumi bersifat homogen isotropis, yaitu setiap lapisan memiliki hambatan jenis dan konduktivitas yang sama dengan harganya untuk ke segala arah dari aliran listrik.

Jika suatu medium homogen dialiri arus listrik searah  $I$  (diberi medan listrik) maka elemen arus  $\delta I$  yang melalui elemen  $\delta A$  dengan kerapatan arus  $J$  adalah

$$\delta I = J \cdot \delta A \quad (2.2)$$

Berdasarkan hukum Ohm, hubungan antara rapat arus  $J$  dengan medan listrik  $E$  adalah

$$J = \sigma E \quad (2.3)$$

Keterangan :  $\sigma$  = konduktivitas bahan (Ohm/meter)

$E$  = medan listrik (volt/meter)

Medan listrik adalah besaran vektor, sehingga digunakan operator differensial

$$E = -\nabla V \quad (2.4)$$

Maka persamaan 2.4 menjadi :

$$J = -\sigma \nabla V \quad (2.5)$$

Arus listrik yang mengalir pada medium homogen memenuhi hukum kontinuitas untuk arus dan didasarkan pada prinsip kekekalan muatan.

$$\nabla \cdot J = -\frac{dq}{dt} \quad (2.6)$$

Apabila arus stasioner,  $q = \text{konstan}$  maka  $\frac{\partial q}{\partial t} = 0$

Sehingga:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2.7)$$

Kemudian mensubstitusi persamaan (2.6) ke persamaan (2.7), maka :

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (2.8)$$

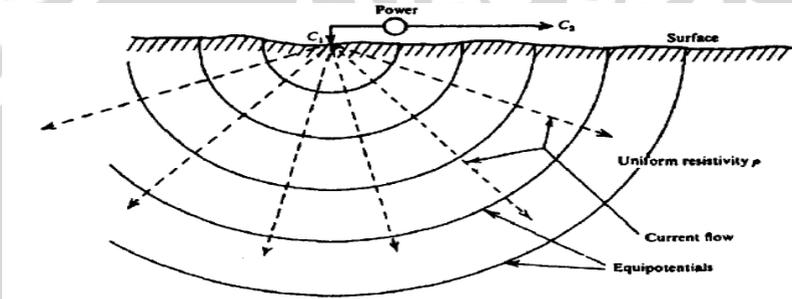
Pada medium homogen isotropis,  $\sigma$  adalah konstanta sehingga menjadi :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) merupakan persamaan laplace karena untuk medium homogen isotropis adalah konstan (Telford, dkk., 1976).

### 2.2.2 Distribusi potensial untuk titik arus di dalam bumi

Jika arus yang masuk ke dalam medium homogen isotropis adalah sumber arus tunggal, maka garis potensialnya akan berbentuk bola, seperti Gambar 2.1



**Gambar 2.1** Sumber arus pada medium homogen (Telford, dkk., 1976)

Dalam koordinat bola operator laplacian dapat di tulis sebagai berikut :

$$\nabla^2 V \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right] + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (2.10)$$

Karena medium homogen isotropis maka medium mempunyai simetri bola dan karena yang mengalir simetri terhadap arah  $\theta$  dan  $\phi$ , maka  $V$  hanya merupakan fungsi dari jarak sehingga :

$$\nabla^2 V = \frac{1}{R^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) \right] = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \left( \frac{2}{r} \right) \frac{\partial V}{\partial r} = 0$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = 0$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} = -\frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} \quad (2.12)$$

Kalikan persamaan diatas dengan  $r^2$ , maka diperoleh

$$r^2 \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} = -2r \frac{\partial V}{\partial r} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{A}{r^2} \quad (2.14)$$

Integrasi dari persamaan (2.14) adalah :

$$V = -\frac{A}{r} + B \quad (2.15)$$

Dimana  $A$  dan  $B$  adalah konstanta dengan menerapkan syarat batas  $r = \infty$  dan  $V = 0$  sehingga nilai  $B = 0$ , maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$V = -\frac{A}{r} \quad (2.16)$$

Arus keluar secara radial dari titik arus maka jumlah arus yang melewati permukaan bola dengan jari-jari  $r$  adalah

$$I = JA \quad (2.17)$$

Dimana  $A$  untuk persamaan 2.17 adalah luas permukaan bola, maka :

$$\begin{aligned} I &= 4\pi r^2 J \\ I &= 4\pi r^2 (-\sigma \nabla V) \\ I &= 4\pi r^2 \left(-\sigma \frac{\partial V}{\partial r}\right) = 4\pi r^2 \left(-\sigma \frac{A}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Karena  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  maka persamaan diatas menjadi

$$A = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (2.19)$$

Maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V = \left(\frac{I\rho}{4\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (2.20)$$

atau

$$\rho = \frac{4\pi r V}{I} \quad (2.21)$$

(Telford, dkk., 1976)

### 2.2.3 Potensial pada elektroda arus tunggal di permukaan bumi

Apabila sebuah elektroda tunggal yang dialiri arus listrik diinjeksikan pada permukaan bumi yang homogen isotropi, maka akan terjadi aliran arus yang menyebar dalam tanah secara radial dan apabila di udara di atasnya memiliki konduktivitas nol, maka garis potensialnya akan berbentuk setengah bola,

Karena permukaan yang dialiri arus adalah permukaan setengah bola, dengan luasan setengah bola  $2\pi r^2$ , maka nilai konstanta  $A$  yaitu :

(Telford, dkk., 1976)

$$A = -\frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.22)$$

Sehingga diperoleh

$$V = -\left(\frac{I\rho}{2\pi}\right)\frac{1}{r} \quad (2.23)$$

atau

$$\rho = \frac{2\pi r}{I} V \quad (2.24)$$

### 2.3 Metode Geolistrik

Geolistrik merupakan salah satu metode Geofisika yang mempelajari sifat aliran listrik bumi dengan menginjeksikan arus listrik ke dalam bumi. Metode geolistrik terdiri dari prinsip dan teknik yang banyak ragamnya. Teknik dalam metode geolistrik antara lain dengan pengukuran medan potensial, arus listrik dan elektromagnetik. Eksplorasi dengan cara geolistrik terdiri dari prinsip dan teknik yang banyak ragamnya baik arus listrik searah maupun bolak-balik yang ditimbulkan oleh proses yang dibuat oleh manusia atau alamiah (Dobrin, 1988).

Metode geolistrik dapat digunakan untuk mengetahui keadaan bawah permukaan pada dasarnya menggunakan tiga fenomena alam yang berhubungan dengan kondisi batuan, antara lain:

1. Resistivitas yang merupakan kebalikan (*invers*) dari konduktivitas, besarnya tergantung pada besar arus dan serta beda potensial.
2. Aktivitas elektrokimia yang diakibatkan oleh elektrolit di bumi.

3. Konstanta dielektrik adalah suatu konstanta yang dapat memberikan informasi kapasitas/kandungan batuan dan formasi batuan untuk menyimpan muatan listrik.

### 2.3.1 Geolistrik Resistivitas

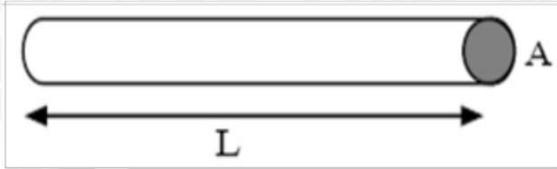
Metode geolistrik resistivitas (hambatan jenis) merupakan suatu metode pendugaan kondisi bawah permukaan bumi dengan memanfaatkan arus listrik yang diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua elektroda arus, kemudian beda potensial yang dihasilkan diukur dengan menggunakan dua elektroda potensial. Hasil pengukuran arus dan beda potensial untuk setiap jarak elektroda tertentu digunakan untuk menentukan variasi harga hambatan jenis masing-masing lapisan di bawah titik ukur (titik *sounding*). Sasaran metode geolistrik adalah mengenai susunan geologi bawah permukaan daerah penelitian. Metode ini juga dapat digunakan untuk mengetahui adanya air tanah, kontruksi lapisan tanah dan eksplorasi mineral.

Metode geolistrik resistivitas didasarkan pada kenyataan bahwa sebagian dari arus listrik yang diberikan pada lapisan tanah, menjalar ke dalam tanah pada kedalaman tertentu dan bertambah besar dengan bertambahnya jarak antar elektroda. Dalam pengukuran geolistrik resistivitas jika sepasang elektroda diperbesar, distribusi potensial pada permukaan bumi akan semakin membesar dengan nilai resistivitas yang bervariasi (Vingoe, 1972).

Perbedaan potensial yang dihasilkan diantara elektroda potensial akan berubah jika kedalaman tersebut terdapat sebuah lapisan dengan hantaran elektrik yang berbeda (Verhoef, 1989).

Prinsip fisis dalam metode geolistrik resistivitas adalah hukum Ohm. Pernyataan tersebut dapat dilihat pada persamaan 2.1.

Untuk silinder konduktor dengan panjang  $L$  dengan luas penampang  $A$  yang mempunyai konduktivitas bahan  $\sigma$  (seperti pada Gambar 2.2) dengan medan listrik  $E$ , maka tahanan yang muncul dirumuskan dengan:



**Gambar 2.2** Konduktor berbentuk silinder (Tipler, 2001).

$$\int d\vec{V} = - \int \vec{E} d\vec{l} \quad (2.25)$$

Rapat arus ( $J$ ) dalam kawat:

$$J = \sigma E = \sigma \frac{V}{L} \quad (2.26)$$

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.27)$$

Beda potensial ( $V$ ) dapat ditulis:

$$V = \frac{L}{\sigma} J = \left( \frac{L}{\sigma A} \right) I \quad (2.28)$$

Dengan substitusi persamaan (2.27) ke persamaan (2.28), maka didapat:

$$R = \frac{L}{\sigma A} = \rho \frac{L}{A} \quad (2.29)$$

dimana:

- $V$  = beda potensial (volt)
- $E$  = medan listrik (volt/meter)
- $\sigma$  = konduktivitas bahan ( $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )
- $\rho$  = tahanan jenis (resistivitas) ( $\text{ohm} \cdot \text{m}$ )
- $A$  = luas penampang konduktor ( $\text{m}^2$ )
- $L$  = panjang konduktor (m)
- $R$  = hambatan (ohm)
- $I$  = arus listrik (ampere)

Beberapa asumsi dasar yang digunakan dalam metode geolistrik resistivitas, antara lain:

1. Bahwa permukaan tanah terdiri dari beberapa lapisan yang dibatasi oleh bidang batas horisontal serta terdapat kontras resistivitas antara bidang batas perlapisan tersebut.
2. Tiap lapisan mempunyai ketebalan tertentu, kecuali untuk lapisan terbawah ketebalannya tak terhingga.
3. Tiap lapisan dianggap bersifat homogen isotropik.
4. Tidak ada sumber arus selain arus yang diinjeksikan di atas permukaan bumi.
5. Arus listrik yang diinjeksikan adalah arus listrik searah (Robinson, 1988).
6. Besarnya arus listrik yang mengalir pada suatu penghantar, berbanding lurus dengan beda potensial antara kedua ujung penghantar, dan dipengaruhi oleh jenis penghantarnya (Tipler, 2001).

### 2.3.2 Metode Pengambilan Data

Dalam akuisisi data geolistrik resistivitas di lapangan terdiri dari beberapa macam metode akuisisi data, diantaranya adalah:

1. *Lateral Mapping*  
Metode ini digunakan untuk mengetahui sebaran harga resistivitas di areal tertentu secara lateral atau horizontal.
2. *Vertical Sounding*  
Metode ini bertujuan mengetahui distribusi harga resistivitas pada suatu titik target *sounding* di bawah permukaan bumi yaitu secara vertikal, cara ini biasanya disebut *sounding 1D* karena resolusi hanya bersifat vertikal.
3. Resistivitas *2D*  
Metode ini merupakan gabungan dari metode *lateral mapping* dan *vertical sounding*. Metode resistivitas *2D* akan memberikan informasi distribusi harga resistivitas secara lateral dan vertikal (kedalaman), sehingga lapisan bawah permukaan bumi dapat diketahui lebih jelas dan target kedalaman yang dicapai lebih dalam (Tachjudin, 1990).

### 2.3.3 Konfigurasi Elektroda

Beberapa macam konfigurasi elektroda yang umum digunakan adalah :

1. Konfigurasi *Wenner*

Jarak  $AM$ ,  $MN$  dan  $NB$  adalah sama dan biasanya dinamakan  $a$ .

2. Konfigurasi *Schlumberger*

Jarak  $AO = BO = s$ ,  $MO = NO = b$ , eksentrisitas  $b/s = 1/3$ , titik  $O$  adalah pusat konfigurasi.

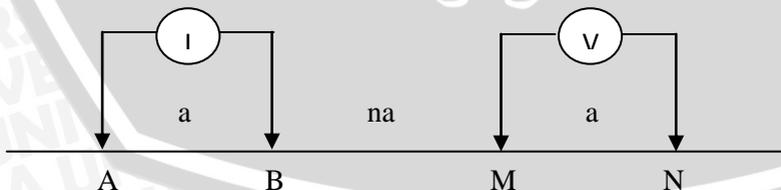
3. Konfigurasi *dipole-dipole* (ditunjukkan Gambar 2.3)

Jarak  $AB = MN = a$ ,  $BM = na$ .

Hasil pengukuran geolistrik di lapangan adalah berupa nilai resistivitas semu dan jarak antar elektroda maka diperlukan proses perhitungan agar diperoleh nilai resistivitas semu lapisan batuan terhadap kedalaman. Nilai resistivitas semu diplot terhadap jarak antar elektroda dengan menggunakan grafik seismilog maka akan diperoleh kurva resistivitas. Penafsiran variasi nilai hambatan jenis terhadap kedalaman dapat menggunakan kurva standar yang diturunkan berdasarkan berbagai variasi perubahan nilai hambatan jenis antar lapisan secara ideal. Cara tersebut dapat digunakan untuk menduga ketebalan lapisan dan jenis lapisan-lapisan batuan di bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitasnya (Santoso, 2002).

### 2.3.4 Konfigurasi Dipole-dipole

Konfigurasi Dipole-Dipole menggunakan 4 elektroda yang terdiri atas 2 elektroda arus dan 2 elektroda potensial. Elektroda arus ditempatkan di urutan pertama. Jarak elektroda arus ( $AB$ ) dan elektroda potensial ( $MN$ ) sebesar  $a$ . sedangkan jarak antara  $AB$  dan  $MN$  adalah  $na$ , dimana  $n$  adalah faktor kali pemindahan elektroda potensial. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.3



**Gambar 2.3** Konfigurasi Dipole-dipole

Penurunan rumus untuk konfigurasi dipole-dipole :

$$R_1 = na$$

$$R_2 = R_3 = a + na$$

$$R_4 = 2a + na$$

Maka beda potensialnya adalah :

$$\Delta V = V_M - V_N$$

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left( \frac{1}{na} - \frac{1}{a + na} \right)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left( \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left( \frac{1}{na + a} - \frac{1}{2a + na} \right)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left\{ \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \left( \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \right\}$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left\{ \left( \frac{1}{na} - \frac{1}{a + na} \right) - \left( \frac{1}{na + a} - \frac{1}{2a + na} \right) \right\}$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left( \frac{2}{na(2 + 3n + n^2)} \right)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \times \left( \frac{2}{na(n + 1)(n + 2)} \right)$$

Sehingga :

$$\Delta V = \frac{I\rho}{\pi na(2 + 3n + n^2)} \quad (2.30)$$

dan resistivitas semu:

$$\rho = \pi an(n + 1)(n + 2) \frac{V}{I} \quad (2.31)$$

Faktor geometris :

$$k = \pi an(n + 1)(n + 2) \quad (2.32)$$

### 2.3.5 Pseudodepth section

*Pseudodepth section* merupakan suatu gambar penampang vertikal dari suatu irisan. Penampang ini terdapat titik-titik plotting yang digambarkan dalam suatu kedalaman yang berbeda berdasarkan posisi elektroda arus dan elektroda potensial yang ditunjukkan Gambar 2.4. Titik - titik tersebut adalah titik antara posisi tengah *receiver* dan posisi *transmitter* membentuk suatu sudut sebesar  $45^\circ$  yang berubah-ubah dengan kerapatan  $n$ . Titik-titik tersebut kemudian dapat ditampilkan dalam bentuk *pseudosection* dengan besarnya resistivitas semu tergantung dari jarak spasi elektroda.

Titik-titik plotting merupakan besar dari penetrasi yang didapatkan pada suatu kedalaman tertentu adalah (Anonymous, 2001):

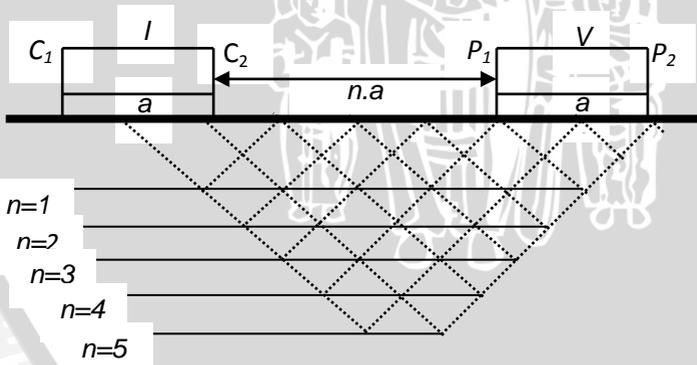
Perlapisan bumi secara vertikal untuk  $n = 1$  adalah  $\frac{1}{4} a$

Perlapisan bumi secara vertikal untuk  $n = 2$  adalah  $\frac{1}{2} a$

Perlapisan bumi secara vertikal untuk  $n = 3$  adalah  $a$

Perlapisan bumi secara vertikal untuk  $n = 4$  adalah  $2a$

Perlapisan bumi secara vertikal untuk  $n = 5$  adalah  $2\frac{1}{2} a$



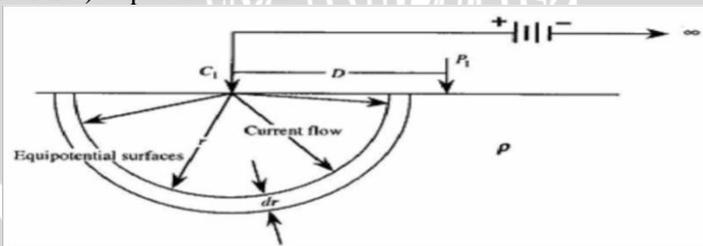
**Gambar 2.4** *Pseudosection* dari pengeplotan data (Anonymous, 2012)

### 2.3.6 Resistivitas Batuan

Resistivitas (tahanan jenis) batuan adalah daya hambat dari batuan terhadap aliran listrik (kebalikan dari konduktivitas batuan) dengan satuan unit: ohm-m. Besar hambatan ini selalu bergantung pada dimensi unit bahan yang dialirinya. Jika bahan mempunyai jenis berbeda maka hambatan jenisnya pun berbeda. Batuan di bumi ini umumnya mempunyai sifat kelistrikan berupa daya hantar listrik (konduktivitas dan resistivitas) dan konstanta dielektrik. Konstanta dielektrik merupakan polarisasi material dalam suatu medium listrik. Konstanta dielektrik menentukan kapasitas induktif efektif dari suatu material batuan dan merupakan respon statik untuk medan listrik AC maupun DC (Dobrin, 1998).

Ketentuan sifat kelistrikan batuan dinyatakan dengan perantaraan nilai tahanan jenis dan tidak dipengaruhi oleh susunan mineralnya melainkan terpengaruh oleh porositas, jumlah air yang terperangkap dalam pori-pori batuan dan derajat kegaraman air yang dikandungnya (Reynold, 1997). Besarnya hambatan suatu batuan tergantung dari hambatan elektrolit yang dikandung dan berbanding terbalik dengan porositas efektif serta kadar jenuhnya. Pada batuan kristalin yang memiliki porositas rendah, aliran elektrik terjadi pada retakan-retakan. Pada kenyataannya, banyaknya diskontinuitas akan menentukan besarnya hambatan. Terbukti bahwa besarnya hambatan batuan bervariasi, terutama pada lapisan tanah tidak konsolidasi (misalnya pasir).

Untuk keadaan bumi yang dianggap homogen isotropis, maka bumi mempunyai bentuk setengah simetri bola, besarnya beda potensial merupakan fungsi jarak ( $r$ ) saja. Jika terdapat satu sumber arus yang mengalir pada medium homogen isotropis (seperti pada Gambar 2.5) dapat dituliskan:

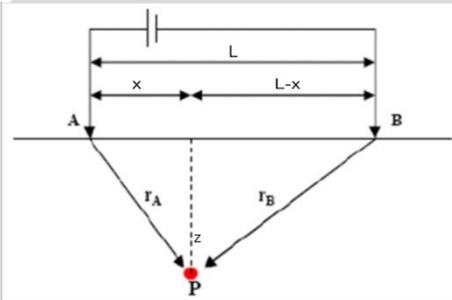


**Gambar 2.5** Sumber Arus Satu Titik (Telford, dkk., 1976)

$$dV = IR = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} V_D &= \int_D^\infty dV = \frac{I\rho}{2\pi} \int_D^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} (-1) \frac{1}{r} \Big|_D^\infty \\ &= \frac{I\rho}{2\pi} (-1) \left( \frac{1}{\infty} - \frac{1}{D} \right) \\ &= \frac{I\rho}{2\pi D} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Pada dua elektroda arus, maka beda potensial yang terjadi pada titik P (Gambar 2.6) yang berjarak  $r_A$  dari titik A dan  $r_B$  dari titik B menurut persamaan (2.35) adalah:

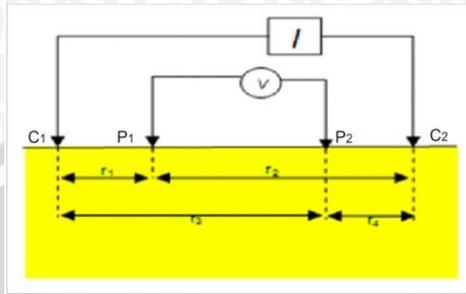


**Gambar 2.6** Sumber Arus Dua Titik pada Permukaan Homogen Isotropis (Telford, dkk., 1976)

$$V_A = \frac{I\rho}{2\pi r_A} \quad \text{dan} \quad V_B = \frac{I\rho}{2\pi r_B} \quad (2.35)$$

$$\Delta V_p = V_A - V_B = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (2.36)$$

Jika terdapat dua arus elektroda dan dua elektroda potensial, maka beda potensial pada  $P_1$  dipengaruhi  $C_1$  dan  $C_2$  dengan jarak  $r_1$  dan  $r_2$ . Hal ini juga terjadi pada titik  $P_2$  yang dipengaruhi arus pada elektroda  $C_1$  dan  $C_2$  dengan jarak  $r_3$  dan  $r_4$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7



**Gambar 2.7** Beda Potensial Elektroda dari Dua Elektroda Sumber Arus pada Permukaan Homogen Isotropis (Telford, dkk., 1976)

Beda potensial yang terjadi pada elektroda  $P_1$  dan  $P_2$  adalah:

$$V_{P_1} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.37)$$

$$V_{P_2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.38)$$

Beda potensial antara  $P_1$  dan  $P_2$  adalah:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \quad (2.39)$$

(Telford et al, 1976)

Maka resistivitas dapat ditulis menjadi:

$$\rho = 2\pi \left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}^{-1} \frac{\Delta V}{I} \quad (2.40)$$

dengan:

$$K = 2\pi \left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}^{-1} \quad (2.41)$$

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.42)$$

Dimana  $K$  merupakan faktor geometri dari konfigurasi elektroda potensial dan elektroda arus. Faktor geometri merupakan besaran penting dalam pendugaan tahanan jenis vertikal maupun horisontal. Perubahan jarak antar elektroda menjadi variasi nilai tahanan jenis terhadap kedalaman. Semakin panjang rentang antar elektrodanya (jarak  $AB$ ) semakin dalam (vertikal) injeksi arus yang dapat dialirkan, namun tergantung pada kuat arus yang digunakan dalam pengambilan data (Santoso, 2002).

Kisaran nilai resistivitas beberapa jenis batuan dan bahan dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1

**Tabel 2.1** Kisaran Nilai Resistivitas Batuan (Blaricom, 1988)

<b>Rock Type</b>	<b>Resistivity Range (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>
<b>Igneous and Metamorphic Rocks</b>	
Granite	$3 \times 10^2 - 10^6$
Andesite	$1.7 \times 10^2 - 4.5 \times 10^4$
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$
Basalt	$10 - 1.3 \times 10^7$
Tuffs	$2 \times 10^3 - 10^5$
Slates various	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$
Quartzites various	$10 - 2 \times 10^8$
<b>Sediments Rocks</b>	
Consolidates shales	$20 - 2 \times 10^3$
Argillites	$10 - 8 \times 10^2$
Conglomerates	$2 \times 10^3 - 10^4$
Sandstones	$1 - 1.6 \times 10^8$
Limestones	$50 - 10^7$
Dolomite	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Unconsolidates wet clay	20
Marls	3 - 70
Clays	1 - 100
Alluvium and sands	10 - 800
Oil sands	4 - 800
<b>Soil and Water</b>	
Groundwater	$0.1 - 10^3$
Brackish water	0.2 - 1
Sea water	0.2 - 0.3

Sifat fisis lain yang mempengaruhi nilai resistivitas adalah porositas dan permeabilitas batuan. Porositas merupakan persentase pori/rongga dari total volume batuan. Selain rongga antar butiran, rongga di dalam batuan dapat juga terbentuk karena adanya sesar atau patahan, dan pelarutan batuan seperti yang sering terbentuk pada batu gamping. Sedangkan permeabilitas merupakan suatu ukuran mudah tidaknya aliran fluida melalui suatu media porus. Material

yang *permeable* memiliki rongga-rongga yang berhubungan satu dengan yang lain sehingga dapat dilalui zat cair. Besarnya lubang tembus dan sifat zat cair akan menentukan permeabilitas material. Umumnya, semakin kecil ukuran partikel penyusun batuan, semakin kecil pula pori-porinya, sehingga permeabilitasnya semakin rendah.

Nilai porositas dan permeabilitas beberapa batuan ditunjukkan pada Tabel 2.2 di bawah ini:

**Tabel 2.2** Porositas dan Permeabilitas Batuan (Seyhan, 1990)

<b>Tipe Batuan</b>	<b>Porositas (%)</b>	<b>Koefisien Permeabilitas (m/hari)</b>
Kerikil	25 – 35	100 – 1000
Pasir	30 – 40	5 – 40
Konglomerat	10 – 25	5 – 15
Loess	25 – 50	≈ 0.1
Batuan pasir (paras)	5 – 20	5 – 20
Batuan pasir dengan lipatan dan fraktur (patahan)	hingga 40	≥ 50
Batuan kapur dengan permeabilitas primer	20 – 35	± 25
Batuan kapur dengan permeabilitas sekunder	» 35	» 25

### 2.3.7 Resistivitas Semu

Pada metode geolistrik resistivitas mengasumsikan bumi memiliki sifat homogen isotropis. Ketika arus diinjeksikan ke dalam bumi, pengaruh beda potensial yang diamati secara tidak langsung adalah hambatan jenis suatu lapisan bumi tertentu. Nilai ini bukan nilai hambatan jenis yang sebenarnya. Nilai hambatan jenis ini tergantung dari konfigurasi elektroda yang dipakai. Pada kenyataannya, bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan nilai resistivitas yang berbeda-beda, sehingga potensial yang diukur merupakan pengaruh dari lapisan-lapisan tersebut. Hambatan jenis ini disebut hambatan jenis (resistivitas) semu, dan dirumuskan dengan:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.43)$$

dimana:  $\rho_a$  = resistivitas semu ( $\Omega\text{m}$ )  
 $K$  = faktor geometris (m)  
 $\Delta V$  = beda potensial (V)  
 $I$  = kuat arus (A)

Resistivitas semu merupakan suatu konsep yang menggambarkan tentang kedalaman dan sifat suatu lapisan tertentu. Konsep ini dapat diilustrasikan seperti Gambar 2.8. Dimisalkan medium yang terdiri dari dua lapisan dan mempunyai nilai resistivitas yang berbeda ( $\rho_1$  dan  $\rho_2$ ). Dalam pengukuran, medium ini akan dianggap sebagai satu lapisan yang homogen dan mempunyai satu harga resistivitas yaitu  $\rho_a$  (*Apparent Resistivity*) atau resistivitas semu.



**Gambar 2.8** Konsep Resistivitas Semu (Telford, dkk., 1976)

Pada medium berlapis, harga resistivitas semu merupakan fungsi jarak bentangan (jarak antar elektroda arus). Untuk jarak antar elektroda arus yang kecil akan memberikan  $\rho_a$  yang harganya mendekati  $\rho$  batuan di dekat permukaan. Sedang untuk jarak bentangan yang besar,  $\rho_a$  yang diperoleh akan mewakili harga  $\rho$  batuan yang lebih dalam. Nilai resistivitas semu yang dihasilkan oleh setiap konfigurasi akan berbeda walaupun jarak antar elektrodanya sama. Umumnya sifat batuan tidak memiliki sifat homogen sempurna, seperti yang ditunjukkan pada data geolistrik. Posisi batuan yang terletak dengan permukaan tanah akan sangat berpengaruh terhadap hasil pengukuran. Hal ini akan membuat data geolistrik akan menyimpang dari yang sebenarnya. Faktor yang dapat mempengaruhi homogenitas lapisan batuan antara lain adanya sisipan batuan lain pada lapisan, pelapukan batuan induk yang tidak seragam, genangan air, pipa dalam tanah, dsb.

## 2.4 Kondisi Geomorfologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian Geolistrik Resistivitas terletak di Tidar Kecamatan Sukun Kota Malang Propinsi Jawa Timur. Secara Geografis Tidar terletak pada ketinggian antara 440 – 667 dpl, serta 112,06<sup>0</sup> Bujur Timur dan 7,06<sup>0</sup> – 8,02<sup>0</sup> Lintang Selatan.

Topografi Kota Malang dipengaruhi oleh adanya daerah pegunungan yaitu Gunung Arjuno disebelah utara, Gunung Tengger disebelah timur, Gunung Kawi disebelah barat, Gunung Kelud disebelah selatan dari lokasi penelitian.

Batuan di Kota Malang didominasi oleh batuan alluvium dan bentukan gunung api kwarter muda yang terdiri dari breksi gunungapi, lava, breksi tufan dan tuf. Pada batuan tufa ini terdapat jenis batuan andesit yang merupakan bahan dasar yang digunakan untuk pembuatan candi.

Pada daerah penelitian di candi badut sendiri merupakan daerah dengan formasi batuan gunungapi tengger atau dalam istilah geologinya *Quarter Vulcano Tengger (Qvt)* diduga formasi batuan ini berumur Pleistosen akhir dan tersusun dari breksi, tuf pasiran, lava, aglomerat dan lahar. Batuan gunungapi ini merupakan hasil endapan piroklastik dan lelehan lava, yang terjadi secara aliran dan jatuhnya dari udara: antara lain aliran awan panas, aliran lava, jatuhan berkala atau jatuhan berangsur dan jatuhan menerus. Berdasarkan kedudukan stratigafinya yang menindih batuan gunungapi berumur lebih tua, dan tertindih oleh batuan gunungapi kwarter atas, tuf rabano, batuan gunungapi bromo, dan pasir gunungapi tengger, maka umumnya diperkirakan pleistosen akhir. Tebal kedua batuan gunungapi tersebut diperkirakan antara 500m dan 1500m. Sebarannya cukup luas, terdapat disekitar G. Arjuna-Welirang, Pg. Tengger, dan meluas ke arah selatan pada Lembar Turen, ke arah timur pada Lembar Probolinggo dan Lembar Lumajang (Suyanto, dkk., 1978).

# UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

