

## BAB II

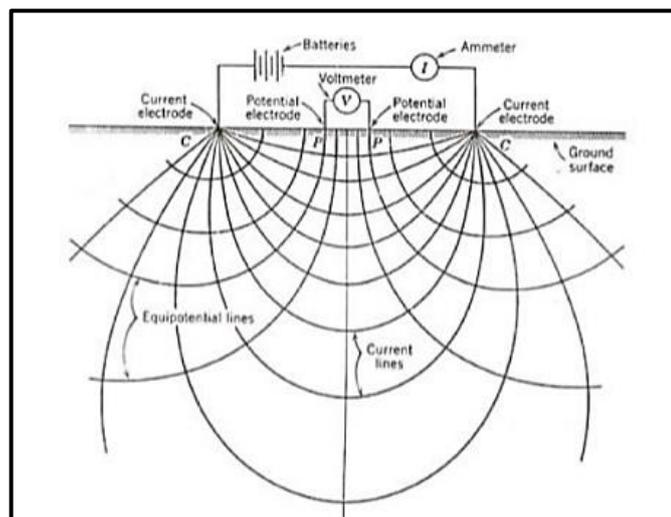
### TEORI DASAR

#### 2.1 Metode Geolistrik

Geolistrik adalah salah satu metode geofisika yang didasarkan pada penerapan konsep kelistrikan pada masalah kebumihan. Tujuannya adalah untuk memperkirakan sifat kelistrikan medium atau formasi batuan bawah permukaan terutama kemampuannya untuk menghantarkan atau menghambat listrik (konduktivitas atau resistivitas) (Legget, 1962).

Pada metode geolistrik resistivitas, arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua elektroda arus ( $C$ ). Kemudian beda potensial diukur melalui dua elektroda potensial ( $P$ ). Dengan adanya aliran arus listrik tersebut maka akan menimbulkan tegangan listrik dalam tanah. Tegangan listrik yang terjadi di permukaan tanah diukur dengan menggunakan multimeter yang dihubungkan dengan dua elektroda potensial ( $P$ ).

Resistivitas ditentukan dari suatu tahanan jenis semu yang dihitung dari pengukuran perbedaan potensial antara elektroda yang ditempatkan di bawah permukaan. Pengukuran suatu beda potensial antara dua elektroda sebagai hasil dua elektroda lain pada titik  $C$  yaitu tahanan jenis di bawah permukaan tanah di bawah elektroda (Tood, 1980).



**Gambar 2.1** Konfigurasi elektroda pada metode geolistrik (Tood, 1980)

### 2.1.1 Sifat Kelistrikan Batuan

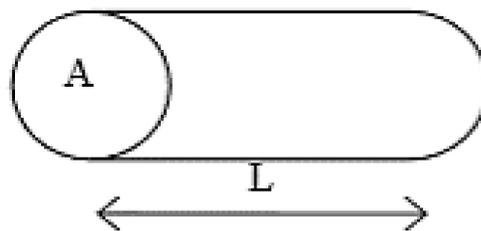
Batuan adalah mineral yang mempunyai daya hantar listrik dan harga tahanan jenis tertentu. Batuan yang sama belum tentu mempunyai tahanan jenis yang sama. Sebaliknya harga resistivitas yang sama bisa dimiliki oleh batuan-batuan yang berbeda, hal ini terjadi karena nilai resistivitas atau tahanan jenis batuan memiliki rentang nilai yang bisa saling tumpang tindih.

Sifat kelistrikan batuan adalah karakteristik dari batuan jika dialirkan arus listrik ke dalamnya. Arus listrik ini dapat berasal dari alam itu sendiri yang diakibatkan terjadinya ketidakseimbangan ataupun arus listrik yang sengaja dimasukkan ke dalam batuan tersebut.

Menurut (Telford, dkk., 1990) digolongkan tiga macam aliran arus listrik di dalam batuan dan mineral yaitu:

#### 1. Konduksi Secara Elektronik

Konduksi ini terjadi jika batuan atau mineral mempunyai banyak elektron bebas sehingga arus listrik dialirkan dalam batuan atau mineral oleh elektron-elektron bebas tersebut. Arus listrik ini dipengaruhi oleh sifat atau karakteristik masing-masing batuan yang dilewatinya. Salah satu sifat atau karakteristik batuan adalah resistivitas (tahanan jenis). Semakin besar nilai resistivitas suatu bahan maka semakin sulit bahan tersebut menghantarkan listrik. Begitu pula sebaliknya apabila nilai resistivitasnya rendah maka akan semakin mudah bahan tersebut menghantarkan arus listrik.



**Gambar 2.2** Silinder konduktor (Telford, dkk., 1990)

Jika ditinjau silinder konduktor dengan panjang  $L$ , luas penampang  $A$ , dan resistansi  $R$ , maka dapat dirumuskan:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

Dimana  $\rho$  adalah resistivitas (tahanan jenis) ( $\Omega m$ ),  $L$  adalah panjang silinder konduktor (m),  $A$  adalah luas penampang silinder konduktor ( $m^2$ ),  $R$  adalah resistansi ( $\Omega$ ).

Sedangkan menurut hukum Ohm, resistansi  $R$  dirumuskan:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Dimana  $R$  adalah resistivitas ( $\Omega$ ),  $V$  adalah beda potensial (*volt*),  $I$  adalah kuat arus (*ampere*).

Dari kedua rumus tersebut didapatkan nilai resistivitas ( $\rho$ ) sebesar:

$$\rho = \frac{VA}{IL} \quad (2.3)$$

Banyak orang sering menggunakan sifat konduktivitas ( $\sigma$ ) batuan yang merupakan kebalikan dari resistivas ( $\rho$ ) dengan satuan ohm/m.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{IL}{VA} = \left(\frac{I}{A}\right) \left(\frac{L}{V}\right) = \frac{J}{E} \quad (2.4)$$

Dimana  $J$  adalah rapat arus (*ampere/m<sup>2</sup>*),  $E$  adalah medan listrik (*volt/m*).

## 2. Konduksi Secara Elektrolitik

Batuan biasanya bersifat *porous* dan memiliki pori-pori yang terisi oleh fluida, terutama air. Batuan-batuan tersebut menjadi konduktor elektrolitik, dimana konduksi arus listrik dibawa oleh ion-ion elektrolitik dalam air.

Konduktivitas dan resistivitas batuan *porous* bergantung pada volume dan susunan porinya. Konduktivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan bertambah banyak, sebaliknya resistivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan berkurang.

Menurut persamaan Archie:

$$\rho_e = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_w \quad (2.5)$$

$\rho_e$  adalah resistivitas batuan ( $\Omega m$ ),  $\emptyset$  adalah porositas,  $S$  adalah fraksi pori-pori yang berisi air dan  $\rho_w$  adalah resistivitas air, sedangkan  $a$ ,  $m$ , dan  $n$  adalah konstanta.  $m$  disebut juga faktor sementasi.

### 3. Konduksi Secara Dielektrik

Konduksi ini terjadi pada batuan yang mempunyai elektron bebas sedikit bahkan tidak ada sama sekali. Karena adanya pengaruh medan listrik dari luar, maka elektron-elektron dalam atom batuan dipaksa berpindah dan berkumpul terpisah dengan intinya, sehingga terjadi polarisasi. Peristiwa ini sangat bergantung pada konstanta dielektrik batuan yang bersangkutan (Hendrajaya dan Arif, 1990).

#### 2.1.2 Potensial Listrik Pada Bumi

Potensial listrik alam atau potensial diri disebabkan adanya terjadi kegiatan elektrokimia mekanik. Faktor pengontrol dari semua kejadian ini adalah air tanah. Potensial ini berasosiasi dengan pelapukan mineral pada bodi sulfida, perbedaan sifat batuan (kandungan mineral) pada kontak geologi, kegiatan bioelektrik dari materi organik korosi, gradien termal dan gradien tekanan. Potensial alam ini dapat dikelompokkan menjadi 4 yaitu:

##### 1. Potensial Elektrokinetik

Potensial ini disebabkan bila suatu larutan bergerak melalui suatu pipa kapiler atau medium yang berpori.

##### 2. Potensial Diffusi

Potensial ini disebabkan bila terjadi perbedaan mobilitas dari ion dalam larutan yang mempunyai konsentrasi berbeda.

##### 3. Potensial Nerust

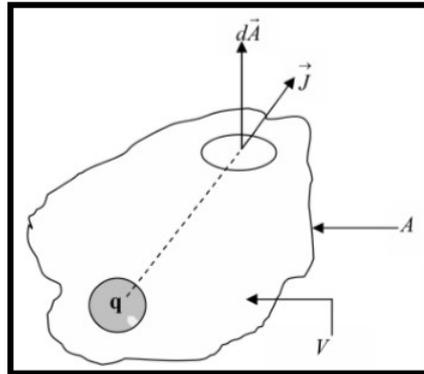
Potensial ini timbul bila suatu elektroda dimasukkan ke dalam larutan homogen.

##### 4. Potensial Mineralisasi

Potensial ini timbul bila dua elektroda logam dimasukkan kedalam larutan homogen.

### 2.1.3 Dasar Perumusan Potensial Geolistrik Metode Resistivitas

Bumi diasumsikan sebagai medium yang homogen isotropis diperlihatkan perjalanan arus yang kontinu pada medium bumi seperti pada **Gambar 2.3**.



**Gambar 2.3** Medium homogen isotropis dialiri listrik (Hendrajaya dan Arif, 1990)

Jika  $d\vec{A}$  adalah elemen luas dan  $\vec{J}$  adalah kerapatan arus listrik maka besarnya arus listrik ( $I$ ) dirumuskan:

$$dI = \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (2.6a)$$

Sedangkan menurut hukum Ohm menghubungkan rapat arus  $\vec{J}$  (dalam *ampere/meter<sup>2</sup>*) dengan medan listrik  $\vec{E}$  (dalam *volt/meter*) yang ditimbulkannya dirumuskan sebagai berikut:

$$\vec{E} = \sigma \vec{J} \quad (2.6b)$$

Dimana  $\sigma$  adalah konduktivitas (dalam *siemens/meter*). Dalam bentuk yang identik dengan hukum Ohm untuk rangkaian listrik sederhana ( $V=IR$ ), persamaan (2.6b) dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{E} = \frac{\vec{J}}{\rho} \quad (2.6c)$$

Jika medan listrik merupakan gradien potensial ( $\vec{V}$ ) maka

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (2.7)$$

$$\vec{J} = -\rho \vec{\nabla}V \quad (2.8)$$

Jika di dalam medium yang dilingkupi oleh permukaan  $A$  tidak terdapat sumber arus maka:

$$\int_A \tilde{\vec{J}} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.9)$$

Menurut teorema Gauss, integral volume dari divergensi arus yang keluar dari volume ( $V$ ) yang dilingkupi permukaan  $A$  adalah sama dengan jumlah total muatan yang ada di dalamnya (ruang  $V$  yang dilingkupi oleh permukaan tertutup  $A$  tersebut), sehingga:

$$\int_0 \tilde{(\vec{\nabla} \cdot \vec{J})} dV = 0 \quad (2.10)$$

Akibatnya:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = 0 \quad (2.11)$$

$$\vec{\nabla} \sigma \cdot \vec{\nabla} V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (2.12)$$

Jika konduktivitas listrik medium ( $\sigma$ ) konstan maka suku pertama pada bagian kiri persamaan (2.12) bernilai nol sehingga didapat persamaan Laplace atau potensial bersifat Harmonik (Hendrajaya dan Arif, 1990).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.13)$$

Dalam koordinat bola persamaan Laplace dapat ditulis sebagai berikut:

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

Anggapan bumi sebagai medium homogen isotropis dimana bumi memiliki simetri bola, sehingga potensial  $V$  merupakan fungsi jarak ( $r$ ) saja. Maka persamaan potensial dalam bumi berbentuk:

$$V = V_{(r)} \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2 V_{(r)}}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV_{(r)}}{dr} = 0 \quad (2.15)$$

$$V_{(r)} = \frac{C_1}{r} + C_2 \quad (2.16)$$

Dengan  $C_1$  dan  $C_2$  adalah konstanta sembarang. Untuk menentukan kedua konstanta tersebut diterapkan syarat batas yang harus dipenuhi potensial  $V_{(r)}$  yaitu: untuk

jarak ( $r$ ) tak terhingga ( $r = \infty$ ) atau jarak yang sangat jauh,  $V_{(r \rightarrow \infty)} = 0$  sehingga  $C_2 = 0$  dan persamaan (2.16) menjadi:

$$V_{(r)} = \frac{C_1}{r} \quad (2.17)$$

$V_{(r)}$  adalah volume,  $C_1$  adalah nilai konstanta dan  $r$  adalah jarak.

#### 2.1.4 Satu Titik Arus di Permukaan

Sumber arus listrik titik yang dipermukaan bumi akan merambat ke segala arah secara radial berbentuk setengah permukaan bola diperlihatkan pada **Gambar 2.4** sehingga jumlah arus yang keluar melalui permukaan bola  $A$  yang berjari-jari  $r$  adalah:

$$I = 2\pi r^2 J \quad (2.18a)$$

$$I = 2\pi r^2 \left( -\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial r} \right) \quad (2.18b)$$

$$I = 2\pi \frac{1}{\rho} C_1 \quad (2.18c)$$

Sehingga,

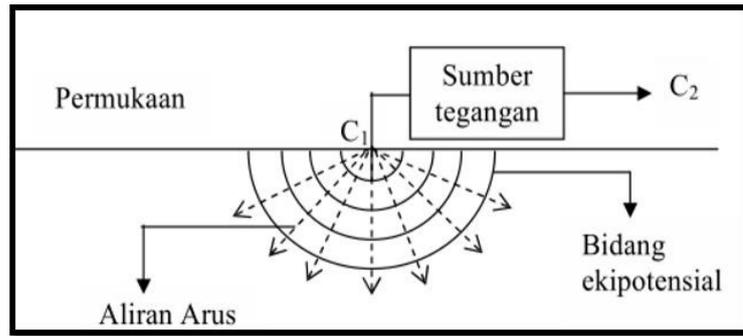
$$C_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.19)$$

Maka persamaan potensial listrik dapat dirumuskan:

$$V_{(r)} = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.20)$$

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (2.21)$$

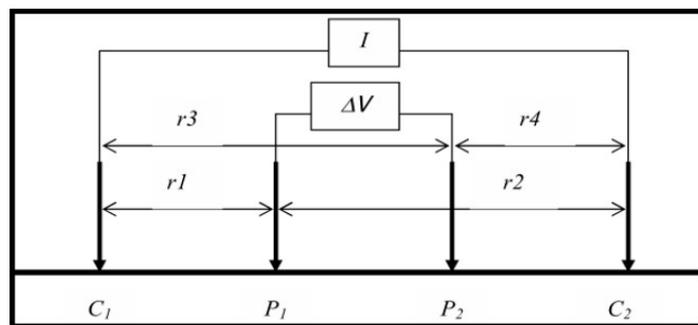
Dengan  $\rho$  adalah nilai resistivitas bahan/ benda dalam satuan  $\Omega\text{m}$  (Telford, dkk., 1990).



Gambar 2.4 Satu titik arus di permukaan (Telford, dkk., 1990)

### 2.1.5 Dua Titik Arus di Permukaan

Dua elektroda untuk mengalirkan arus  $C_1$  dan  $C_2$  beda potensialnya diukur antara 2 titik dengan dua elektroda potensial  $P_1$  dan  $P_2$ . Apabila terdapat elektroda arus  $C_1$  yang terletak pada permukaan suatu medium homogen, terangkai dengan elektroda arus  $C_2$  dan diantaranya ada dua elektroda potensial  $P_1$  dan  $P_2$  yang dibuat dengan jarak tertentu diperlihatkan pada **Gambar 2.5**, maka potensial yang berada di dekat titik elektroda tersebut bisa dipengaruhi oleh kedua elektroda arus. Oleh karena itu potensial  $P_1$  yang disebabkan arus di  $C_1$  dengan memasukkan nilai  $r$  fungsi jarak diatas pada Persamaan (2.19), maka potensial di titik  $P_1$  adalah



Gambar 2.5 Dua titik arus di permukaan (Telford, dkk., 1990)

$$V_{P_1} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.22)$$

$r_1$  dan  $r_2$  adalah jarak elektroda potensial  $P_1$  terhadap elektroda-elektroda arus, sedangkan potensial di titik  $P_2$  adalah:

$$V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.23)$$

$r_3$  dan  $r_4$  adalah jarak potensial  $P_2$  terhadap elektroda-elektroda arus. Selisih potensial antara 2 titik itu:

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} \quad (2.24)$$

Sehingga,

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (2.25)$$

Berdasarkan persamaan (2.20, 2.21 dan 2.25) maka besarnya tahanan jenis semu adalah

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} 2\pi \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)^{-1} \quad (2.26)$$

Dimana:  $\Delta V$  = beda potensial antara  $P_1$  dan  $P_2$  (volt)

$I$  = besarnya arus yang diinjeksikan melalui elektroda  $C_1$  dan  $C_2$  (ampere)

$r_1$  = jarak antara  $C_1$  dan  $P_1$  (meter)

$r_2$  = jarak antara  $C_2$  dan  $P_2$  (meter)

$r_3$  = jarak antara  $C_1$  dan  $P_2$  (meter)

$r_4$  = jarak antara  $C_2$  dan  $P_2$  (meter)

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)^{-1} \quad (2.27)$$

Dimana  $K$  adalah faktor geometri yang berdimensi panjang (meter), yaitu letak kedua elektroda potensial terhadap letak kedua elektroda arus mempengaruhi besar beda potensial terhadap letak kedua elektroda arus (Hendrajaya dan Arif, 1990).

### 2.1.6 Konsep Resistivitas Semu

Metode ini diasumsikan bahwa bumi mempunyai sifat homogen isotropis. Dengan asumsi ini, resistivitas yang terukur merupakan resistivitas sebenarnya dan tidak tergantung atas spasi elektroda. Pada kenyataannya, bumi terdiri atas lapisan-lapisan dengan  $\rho$  yang berbeda-beda sehingga potensial yang terukur merupakan pengaruh dari lapisan-lapisan tersebut. Maka harga resistivitas yang terukur bukan

merupakan harga resistivitas untuk satu lapisan saja, hal ini terutama untuk spasi elektroda yang lebar.

$$\rho_a = \frac{\kappa \Delta V}{I} \quad (2.28)$$

Dengan  $\rho_a$  merupakan resistivitas semu yang bergantung pada spasi elektroda. Dan sebaliknya untuk kasus tak homogen, bumi diasumsikan berlapis-lapis dengan masing-masing lapisan mempunyai harga resistivitas yang berbeda. Resistivitas semu merupakan resistivitas dari suatu medium fiktif homogen yang ekuivalen dengan medium berlapis yang ditinjau. Sebagai contoh medium berlapis yang ditinjau misalnya terdiri dari dua lapis yang mempunyai resistivitas yang berbeda ( $\rho_1$  dan  $\rho_2$ ) dianggap sebagai medium satu lapis homogen yang mempunyai satu harga resistivitas yaitu resistivitas semu  $\rho_a$ , dengan konduktansi lapisan fiktif sama dengan jumlah konduktansi masing-masing lapisan  $\sigma_f = \sigma_1 + \sigma_2$  (Rahmawati, 2009).



**Gambar 2.6** Medium berlapis dengan variasi resistivitas (Rahmawati, 2009)

### 2.1.7 Resistivitas Batuan

Dari semua sifat fisika batuan dan mineral, resistivitas memperlihatkan variasi harga yang sangat banyak. Konduktor biasanya didefinisikan sebagai bahan yang memiliki resistivitas kurang dari  $10^{-8} \Omega m$ , sedangkan isolator memiliki resistivitas lebih dari  $10^7 \Omega m$ . Dan selain itu ada bahan semikonduktor. Di dalam konduktor berisi banyak elektron bebas dengan mobilitas yang sangat tinggi. Sedangkan pada semikonduktor, jumlah elektron bebasnya lebih sedikit. Isolator dicirikan oleh ikatan ionic sehingga elektron-elektron valensi tidak bebas bergerak (Telford, dkk., 1990).

Berdasarkan harga resistivitas listriknya, batuan, dan mineral dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu:

1. Konduktor baik :  $10^{-8} < \rho < 1 \Omega\text{m}$
2. Konduktor pertengahan :  $1 < \rho < 10^7 \Omega\text{m}$
3. Isolator :  $\rho > 10^7 \Omega\text{m}$

Variasi resistivitas berbagai bahan dan mineral bumi ditunjukkan dalam tabel dibawah.

**Tabel 2.1** Tahanan jenis beberapa bahan (Santoso,2002)

Bahan	Resistivitas ( $\Omega\text{m}$ )
Udara (dimuka bumi)	$2 \times 10^6 - 5 \times 10^7$
Air	
Distilasi	$2 \times 10^7$
Permukaan	$3 \times 10^3 - 10^5$
Tambang	$40 - 6 \times 10^4$
Laut	21
Tembaga	
Murni	$1.7 \times 10^{-6}$
Bijih	0.1
Besi	
Murni	$10^{-5}$
Meteorit	$3 \times 10^{-4}$
Mineral	
Kalsit	$5.5 \times 10^{15}$
Galena	0.001 – 0.25
Magnetic	0.008 – 0.5
Pirit	0.002 – 9
Kwarsa	$4 \times 10^{12}$
Batugaram	$10^4 - 10^7$
Belerang	$10^{14} - 10^{17}$
Batuan	
Granit	$5 \times 10^5 - 10^9$
Gabro	$10^5 - 10^8$
Gneiss	$2 \times 10^7 - 10^9$
Skis	$10^3 - 3 \times 10^9$
Batu gamping	$6 \times 10^3 - 3 \times 10^5$
Batupasir	$10^2 - 10^5$
Serpilh	$2 \times 10^3 - 10^5$
Lempung dan tanah	$10^2 - 10^6$

**Tabel 2.2** Resistivitas batuan sedimen (Telford, dkk., 1990)

Batuan	Resistivitas ( $\Omega\text{m}$ )
<i>Consolidated shales</i> (serpihan gabungan)	$20 - 2 \times 10^3$
Argilites	$10 - 8 \times 10^2$
Konglomerat	$2 \times 10^3 - 10^4$
Batupasir	$1 - 6.4 \times 10^8$
Batu gamping	$50 - 10^7$
<i>Unconsolidated wet clay</i> (lempung basah tidak gabungan)	20
Lempung	1- 100
Alluvium dan pasir	10- 800
<i>Oil sands</i>	4- 800

### 2.1.8 Metode *Electrical Resistivity Tomography*

Metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) merupakan metode yang dapat mengukur sifat kelistrikan material di bawah permukaan yang didasarkan pada nilai resistivitas material dengan cara menginjeksikan arus listrik dan mengukur potensialnya di permukaan tersebut (Perbriyanto, 2016).

Metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) memiliki beberapa pola pengukuran atau jenis konfigurasi yang digunakan untuk menunjang dalam sistem pengambilan data. Dalam hal ini jenis konfigurasi yang sering digunakan adalah konfigurasi Wenner, Schlumberger, *Dipole-Dipole*, *Pole-Dipole* hingga perpaduan antara dua jenis konfigurasi yakni Konfigurasi Wenner-Schlumberger (Loke, 2010).

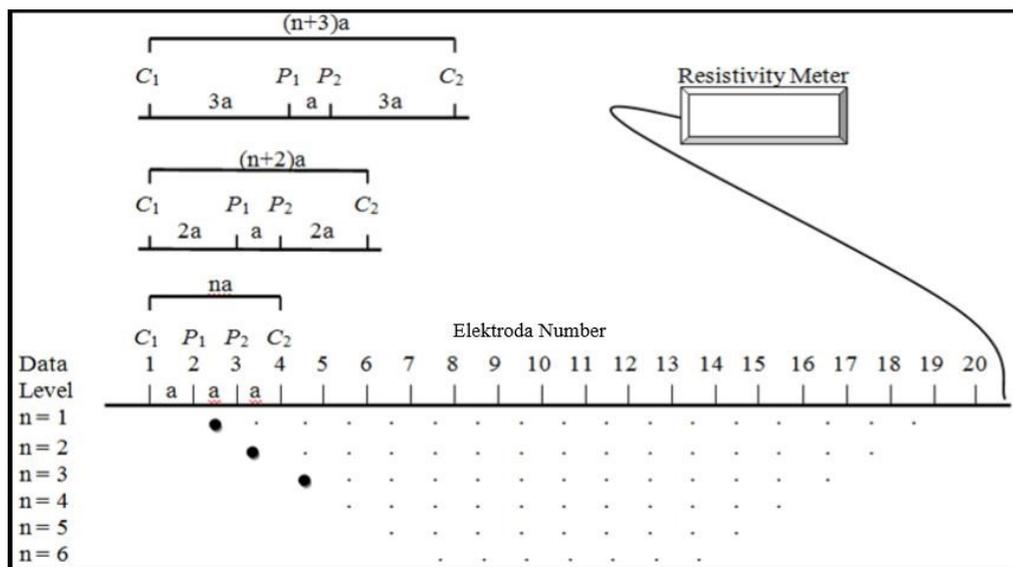
#### 2.1.8.1 Konfigurasi *Wenner-Schlumberger*

Metode ERT konfigurasi *wenner-schlumberger* merupakan gabungan antara konfigurasi *wenner* dan *schlumberger*. Konfigurasi ini digunakan dalam eksplorasi yang sifatnya relatif dangkal. *Wenner-Schlumberger* adalah salah satu konfigurasi paling umum digunakan untuk survei resistivitas 2D. Kedalaman rata-rata pada konfigurasi ini 10% lebih besar dari konfigurasi *wenner*. Konfigurasi *wenner-schlumberger* juga memiliki cakupan *horizontal* sedikit lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi *wenner*. Cakupan data *horizontal* sedikit lebih lebar dari konfigurasi *wenner*, tapi jumlah data yang diperoleh lebih sedikit dari konfigurasi

*dipole-dipole*. Dengan demikian konfigurasi *wenner-schlumberger* saling menutupi kelemahan masing-masing konfigurasi (Telford, dkk., 1990).

Konfigurasi *wenner-schlumberger* adalah konfigurasi dengan aturan jarak spasi yang tetap dengan faktor  $n$  untuk konfigurasi *wenner-schlumberger*, dengan perbandingan jarak antara elektroda C1-C2 dengan spasi antara P1-P2. Sehingga jika jarak antar elektroda potensial P1 dan P2 adalah  $a$ , maka jarak antar elektroda arus (C1 dan C2) adalah  $2na+a$ . Proses penentuan resistivitas menggunakan 4 buah elektroda yang diletakkan dalam sebuah garis lurus. Faktor geometri konfigurasi *wenner-schlumberger* dapat disubstitusi dari nilai jarak spasi elektroda pada **Gambar 2.7** ke persamaan (2.26), sehingga diperoleh faktor geometrik  $K$  sebagai berikut:

$$K = \pi n(n + 1)a \quad (2.29)$$



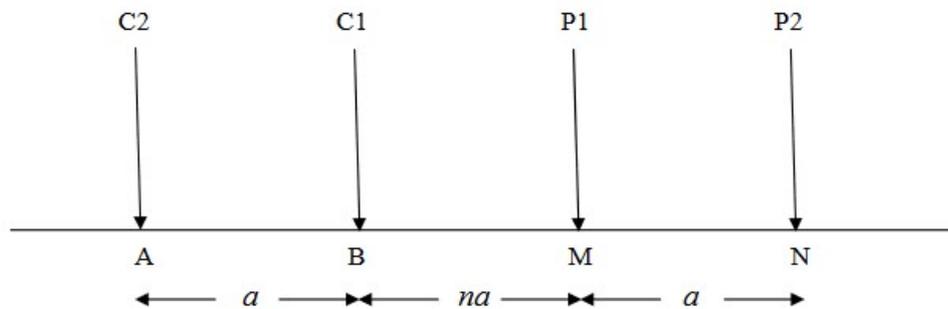
**Gambar 2.7** Pengaturan elektroda konfigurasi *wenner-schlumberger* (Telford, dkk., 1990)

### 2.1.8.2 Konfigurasi *Dipole-dipole*

Metode geolistrik konfigurasi *dipole-dipole* dapat diterapkan untuk mendapatkan gambaran bawah permukaan pada objek yang penetrasinya relatif lebih dalam. Metode ini sering digunakan dalam survei-survei resistivitas karena rendahnya efek elektromagnetik yang ditimbulkan antara sirkuit arus dan potensial (Loke, 1999).

Susunan elektroda konfigurasi *dipole-dipole* dapat dilihat pada **Gambar 2.8**. Spasi antara dua elektroda arus dan elektroda potensial sama yaitu  $a$ . Konfigurasi ini mempunyai faktor lain yaitu  $n$  yang merupakan rasio jarak antara elektroda  $C_1$  dan  $P_1$  ke  $C_2 - C_1$  atau  $P_1 - P_2$  dengan jarak pisah  $a$ .

Pengukuran ini dilakukan dengan memindahkan elektroda potensial pada suatu penampang dengan elektroda arus tetap, kemudian pemindahan elektroda arus pada spasi  $n$  berikutnya diikuti oleh pemindahan elektroda potensial sepanjang penampang seterusnya hingga pengukuran elektroda arus titik terakhir pada penampang.



**Gambar 2.8** Elektroda arus dan potensial konfigurasi *dipole-dipole* (Reynolds, 1997)

Faktor geometri pada konfigurasi elektroda *dipole-dipole* berdasarkan persamaan (2.27) adalah

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{na} - \frac{1}{a+na} - \frac{1}{a+na} + \frac{1}{2a+na} \right)^{-1} \quad (2.30)$$

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{na} - \frac{2}{a+na} + \frac{1}{2a+na} \right)^{-1} \quad (2.31)$$

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

## 2.2 Teori Inversi

Proses inversi adalah suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai distribusi sifat fisis bawah permukaan (Supriyanti, 2007). Tujuan dari inversi adalah memperoleh pemodelan hasil observasi yang merupakan proses *try and error* dengan melakukan modifikasi pada parameter pemodelan sehingga didapatkan kecocokan antara data perhitungan inversi data lapangan (Grandis, 2009).

Model inversi dapat dimodifikasi secara iterasi sehingga respon model menyerupai hasil pengukuran. Data terukur dapat ditulis dalam vektor kolom  $y$  sebagai berikut:

$$y = \text{kolom}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (2.33)$$

Dimana  $m$  adalah banyaknya pengukuran. Respon model  $f$  dapat ditulis sebagai berikut:

$$f = \text{kolom}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (2.34)$$

Pada nilai data resistivitas menggunakan logaritma dari nilai *true resistivity* untuk hasil pengukuran respon model dan parameter model. Parameter model dapat direpresentasikan oleh vektor  $q$  sebagai berikut:

$$q = \text{kolom}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (2.35)$$

Dimana  $n$  merupakan banyaknya parameter model. Hasil pengukuran dan respon model memiliki perbedaan dalam vektor  $g$  sebagai berikut:

$$g = y - f \quad (2.36)$$

Metode optimasi *least square* memodifikasi model awal hingga jumlah kuadrat kesalahan  $E$  dari selisih antara respon model dan hasil pengukuran.  $E$  dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E = g^t g \quad (2.37)$$

Persamaan Gauss–Newton digunakan untuk mengurangi kesalahan di persamaan (2.34) dan untuk menentukan perubahan dalam parameter model yang seharusnya dapat mengurangi jumlah kuadrat kesalahan.

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (2.38)$$

Dimana  $\Delta q$  adalah vektor perubahan parameter model, dan  $J$  adalah turunan parsial pada *Matriks Jacobian*. Elemen *Matriks Jacobian* diperoleh sebagai berikut:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial f_j} \quad (2.39)$$

Persamaan (2.39) menggambarkan perubahan model pada respon model ke- $i$  ( $i^{\text{th}}$  parameter model) yang disebabkan oleh perubahan parameter model ke- $j$  ( $j^{\text{th}}$  model

parameter). Setelah melakukan perhitungan vektor perubahan parameter, maka didapatkan sebuah model baru yang diperoleh dari persamaan (2.40) sebagai berikut:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (2.40)$$

Pada aplikasinya, persamaan kuadrat terkecil sederhana persamaan (2.38) jarang digunakan pada proses inversi geofisika. Kadang jika input model awal yang tidak ideal, model selanjutnya akan jauh dari yang diharapkan karena memiliki nilai yang tidak realistis. Salah satu metode untuk menghindari masalah tersebut adalah dengan menggunakan modifikasi *Marquardt-Levenberg* untuk persamaan *Gauss-Newton* yang dalam bentuk persamaan (2.40) sebagai berikut:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_k = J^T g \quad (2.41)$$

$I$  merupakan matriks identitas.  $\lambda$  merupakan faktor pengali, atau sering disebut faktor damping. Metode Gauss handal dalam inversi *resistivity sounding*, namun ketika jumlah parameter model sangat banyak, seperti model inversi 2D atau 3D akan terjadi kendala, seperti distribusi nilai resistivitas yang tidak menggambarkan kondisi sebenarnya. Solusi dari masalah ini, persamaan kuadrat terkecil *Gauss-Newton* dimodifikasi sehingga dapat meminimalkan variasi spasial pada parameter-parameter model tersebut. Metode kuadrat terkecil *smoothness-constraint* terdapat dalam bentuk persamaan (2.41) sebagai berikut:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (2.42)$$

$$F = a_x C_x^T C_x + a_y C_y^T C_y + a_z C_z^T C_z \quad (2.43)$$

Dimana  $C_x$ ,  $C_y$ , dan  $C_z$  merupakan matriks pada arah x, y, z.

Metode ini digunakan untuk menghasilkan model variasi resistivitas yang *smooth*, namun berlaku jika resistivitas bawah permukaan yang sebenarnya bersifat halus dan gradasi. Beberapa kasus, kondisi geologi di suatu daerah hampir homogen tetapi dengan batas-batas lapisan yang tajam. Solusi untuk kasus tersebut, persamaan (2.41) dapat dimodifikasi untuk meminimalkan perubahan yang absolut pada nilai resistivitas, sehingga dapat memberikan hasil model yang lebih baik.

Metode ini dikenal sebagai metode inversi blok, sehingga menjadi persamaan (2.44).

$$(J^T J + \lambda F_r) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_r q_k \quad (2.44)$$

$$F = a_x C_x^T R_m C_x + a_y C_y^T R_m C_y + a_z C_z^T R_m C_z \quad (2.45)$$

$R_d$  dan  $R_m$  merupakan *weighting* matriks, sehingga elemen – elemen data yang tidak sesuai diberi bobot yang sama dalam proses inversi.

### 2.3 Metode *Well Logging*

*Logging* adalah pengukuran satu atau lebih kuantitas fisik di dalam atau di sekitar lubang sumur relatif terhadap kedalaman sumur atau terhadap waktu atau keduanya. Kata *logging* berasal dari kata Bahasa Inggris "log" yang berarti catatan atau rekaman. Data "*wireline logs*" diambil di dalam sumur memakai alat yang disebut "*logging tool*", ditransmisikan lewat kabel konduktor listrik (*wireline*) ke atas permukaan untuk direkam dan diolah (Samperuru, 2005).

*Well logging* merupakan perekaman karakteristik dari suatu formasi batuan yang diperoleh melalui pengukuran pada sumur bor (Ellis, dkk., 2008). Data yang dihasilkan disebut sebagai *well log*. Berdasarkan proses kerjanya, *logging* dibagi menjadi dua jenis, yaitu *wireline logging* dan *logging while drilling* bor (Ellis, dkk., 2008). *Wireline logging* dilakukan ketika pemboran telah berhenti dan menggunakan kabel sebagai alat untuk mentransmisikan data. Pada *logging while drilling*, *logging* dapat dilakukan bersamaan dengan pemboran. *Logging* jenis ini tidak menggunakan kabel untuk mentransmisikan data. Saat ini *logging while drilling* lebih banyak digunakan karena lebih praktis.

Dalam melengkapi data geofisika *log* dari lubang bor yang telah selesai diperlukan suatu rangkaian *probe* (juga dikenal sebagai perkakas atau *sondes*). Jenis tanggapan pada *probe* dalam mengukur sinar gamma alami tergantung pada komposisi kimia batuanannya. Batuan serpih berisi *potassium-bearing* mineral tanah liat dan sejumlah uranium kecil, *thorium* dan hasil runtuhannya. Akibatnya *probe logging* sinar gamma merespon paling kuat ke batuserpih (*shalestone*) dan batulempung (*claystone*). Respon berkurang ketika isi dari batuan serpih berkurang melalui *siltstone* dan batupasir kotor. Batupasir umumnya memiliki tingkat paling

rendah dari radiasi gamma alami. Pemancaran radiasi gamma alami mampu mendeteksi lapisan permeabel dan impermeabel (Darling, 2005).

Metode *Well Logging* dapat diilustrasikan seperti yang terlihat pada **Gambar 2.9**.



**Gambar 2.9** Pengukuran *well logging* (Darling, 2005)

*Well Logging* dapat dilakukan dengan dua cara dan bertahap, yaitu:

1. *Openhole Logging*

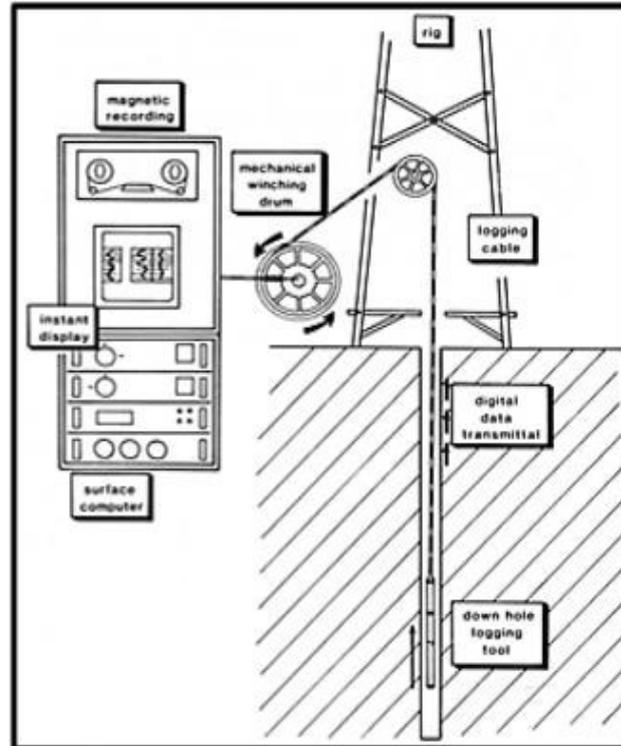
*Openhole Logging* ini merupakan kegiatan *logging* yang dilakukan pada sumur/lubang bor yang belum dilakukan pemasangan *casing*. Pada umumnya tahap ini semua jenis *log* dapat dilakukan.

2. *Casedhole Logging*

*Casedhole Logging* merupakan kegiatan *logging* yang dilakukan pada sumur/lubang bor yang sudah dikerjakan pemasangan *casing*. Pada tahapan ini hanya *log* tertentu yang dapat dilakukan antara lain adalah *log Gamma Ray*, *Caliper*, NMR, dan CBL.

Parameter-parameter sifat batuan utama yang diukur meliputi temperatur, resistivitas, densitas, porositas, permeabilitas dan sebagainya yang tergambar dalam bentuk kurva-kurva *log*. Sifat-sifat dasar batuan yang tergambar dalam kurva *log* diperlukan untuk menghitung (Harsono, 1997):

- Kapasitas/kemampuan batuan menampung fluida.
- Jumlah fluida dalam batuan tersebut.
- Kemampuan fluida mengalir dari batuan ke lubang sumur bor.



**Gambar 2.10** Skematik diagram pengaturan *wireline log* modern (Rider, 2002)

### 2.3.1 Tipe-Tipe *Log*

*Log* adalah suatu grafik kedalaman (dalam waktu) dari suatu set yang menunjukkan parameter fisik, yang diukur secara berkesinambungan dalam sebuah sumur (Harsono, 1997). Ada 4 tipe atau jenis *log* yang biasanya digunakan dalam interpretasi, yaitu:

- *Log* listrik, terdiri dari *log* SP (*Spontaneous Potential*), dan *log* resistivitas.
- *Log* radioaktif, terdiri dari *log* GR (*Gamma Ray*), *log* porositas (*log* densitas dan *log* neutron)
- *Log* akustik berupa *log* *Sonic*.
- *Log* *Caliper*

Pada penelitian kali ini jenis *logging* yang digunakan ialah *log* listrik. *Log* listrik merupakan suatu jenis *log* yang digunakan untuk mengukur sifat kelistrikan

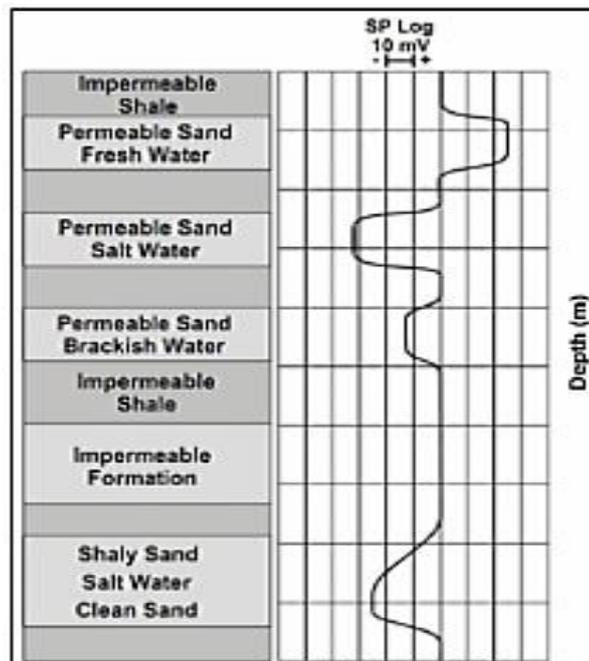
batuan, yaitu resistivitas atau tahanan jenis batuan dan potensial diri dari batuan. Adapun jenis *log* listrik yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

### 1. *Log Spontaneous Potensial (SP)*

*Log SP* adalah rekaman perbedaan potensial listrik antara elektroda di permukaan dengan elektroda yang terdapat di lubang bor yang bergerak naik-turun. Agar SP dapat berfungsi maka lubang harus diisi oleh lumpur konduktif. *Log SP* digunakan untuk:

- Identifikasi lapisan permeabel.
- Mencari batas-batas lapisan permeabel dan korelasi antar sumur berdasarkan lapisan tempat penelitian.
- Menentukan nilai resistivitas air formasi ( $R_w$ ).
- Memberikan indikasi kualitatif lapisan serpih.

Pada lapisan serpih (*shale*), kurva SP umumnya berupa garis lurus yang disebut garis dasar serpih, sedangkan pada formasi permeabel kurva SP menyimpang dari garis dasar serpih dan mencapai garis konstan pada lapisan permeabel yang cukup tebal, yaitu garis pasir. Penyimpangan SP dapat ke kiri atau ke kanan tergantung pada kadar garam air formasi dan filtrasi lumpur (Rider, 2002).

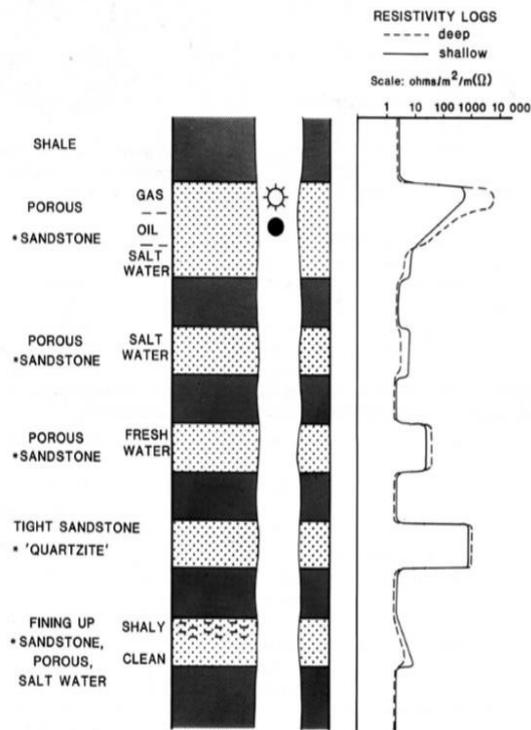


Gambar 2.11 Respon *log* SP (Rider, 2002)

*Log SP* hanya dapat menunjukkan lapisan permeabel namun tidak dapat mengukur harga absolut dari permeabilitas maupun porositas dari suatu formasi. *Log SP* sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti resistivitas formasi, air lumpur pemboran, ketebalan formasi dan salinitas air formasi. Sehingga jika salinitas air formasi dalam lapisan lebih besar dari salinitas lumpur, maka kurva *SP* akan berkembang negatif, dan jika salinitas air formasi dalam lapisan lebih kecil dari salinitas lumpur maka kurva *SP* akan berkembang positif. Dan apabila salinitas air formasi dalam lapisan sama dengan salinitas lumpur maka defleksi kurva *SP* akan menunjukkan garis lurus sebagaimana pada *shale* (Asquith, 1976).

## **2. Log Resistivitas**

Resistivitas atau tahanan jenis suatu batuan adalah suatu kemampuan batuan untuk menghambat jalannya arus listrik yang mengalir melalui batuan tersebut (Darling, 2005). Nilai resistivitas rendah apabila batuan mudah untuk mengalirkan arus listrik, sedangkan nilai resistivitas tinggi apabila batuan sulit untuk mengalirkan arus listrik. *Log resistivitas* digunakan untuk mendeterminasi zona hidrokarbon dan zona air, yang mengindikasikan zona permeabel dengan mendeterminasi porositas resistivitas, karena batuan dan matrik tidak konduktif, maka kemampuan batuan untuk menghantarkan arus listrik tergantung pada fluida dan pori.



**Gambar 2.12** Kontras karakteristik resolusi lapisan dari alat resistivitas (Rider, 2002)

Untuk tujuan geologi, *log* resistivitas yang digunakan harus diketahui kemampuan resolusinya. *Log microtool* memberikan resolusi sangat baik untuk identifikasi lapisan geologi. Laterolog mampu memberikan gambaran lapisan pada skala yang tepat untuk menunjukkan indikasi batas lapisan, tetapi penggunaannya harus digunakan dan dikorelasikan dengan *log* lainnya. *Log* induksi memberikan resolusi batas lapisan yang sangat buruk, tetapi pada saat yang sama semua efek lapisan dirata-rata sedemikian rupa untuk membuat *trend* litologi menonjol. Ketika suatu formasi di bor, air lumpur pemboran akan masuk ke dalam formasi, sehingga membentuk zona yang terinvasi.

## 2.4 Hidrogeologi

Hidrogeologi adalah cabang dari ilmu geologi yang mempelajari keberadaan dan karakteristik air tanah serta hubungan/interaksinya terhadap batuan. Interaksi dapat berupa interaksi fisik, kimia atau gabungan dari keduanya. Hidrogeologi merupakan suatu studi interaksi antara material-material geologi beserta proses-prosesnya, dengan air, khususnya air tanah (Hendayana, 1994). Hidrogeologi merupakan bagian dari hidrologi yang mempelajari penyebaran dan pergerakan air

tanah dalam di tanah dan batuan di kerak bumi (umumnya adalah akuifer). Secara umum hidrogeologi mempelajari tentang air tanah. Selain mempelajari air yang berada di dalam tanah dan batuan, hidrogeologi juga membahas air permukaan. Dalam mempelajari air, baik air yang berada di dalam maupun di permukaan tanah dan batuan, selalu berkaitan dengan klimatologi. Hal ini disebabkan karena siklus hidrologi pada dasarnya melibatkan iklim, cuaca dan hujan. Hidrogeologi membahas klimatologi, khususnya pada saat mempelajari tentang pertimbangan air yang ada di suatu daerah atau dikenal dengan neraca air (Rolia dan Surandono, 2018).

#### **2.4.1 Akuifer (*Aquifer*)**

Akuifer adalah lapisan batuan dibawah permukaan tanah yang mengandung air dan dapat dirembesi air (Sapiie, dkk., 2008). Akuifer sering pula disebut waduk air atau formasi batuan pembawa air. Ada berbagai formasi geologi yang dapat berfungsi sebagai akuifer. Formasi geologi tersebut adalah endapan aluvial, batu gamping, batuan vulkanik, batupasir serta batuan beku dan batuan metamorf (Tood, 1980). Sekitar 90% air tanah terdapat pada endapan aluvial yang merupakan bahan lepas seperti pasir dan kerikil.

Menurut (Kodoatie, 1996) berdasarkan litologinya, akuifer dapat dibedakan menjadi empat macam, yaitu:

##### **1. Akuifer Bebas atau Akuifer Tidak Tertekan (*Unconfined Aquifer*)**

Akuifer bebas adalah air tanah dalam akuifer tertutup dengan lapisan *impermeable*, dan merupakan akuifer yang mempunyai muka air tanah. Akuifer bebas ini merupakan akuifer jenuh air (*saturated*). Lapisan pembatasnya yang merupakan akuitar, hanya pada bagian bawah dan tidak ada pembatas *aquitard* di lapisan atas dikarenakan batas di lapisan atas berupa muka air tanah. Jadi permukaan air tanah bebas adalah batas antara *zone* yang jenuh dengan air tanah dan *zone* yang erosi (tak jenuh) di atas *zone* yang jenuh.

##### **2. Akuifer Bocor (*Leakage Aquifer*)**

Akuifer bocor adalah suatu akuifer dimana air tanah terkekang di bawah lapisan yang setengah kedap air sehingga akuifer disini terletak antara akuifer bebas dan akuifer terkekang.

### 3. Akuifer Melayang (*Perched Aquifer*)

Akuifer melayang adalah jika di dalam zona erosi terbentuk sebuah akuifer di atas lapisan *impermeable*. Akuifer melayang ini tidak dapat dijadikan sebagai suatu usaha pengembangan air tanah, karena mempunyai variasi permukaan air dan volumenya yang kecil.

### 4. Akuifer Tertekan (*Confined Aquifer*)

Akuifer tertekan adalah akuifer dimana air tanah yang terletak di bawah lapisan kedap air (*impermeable*) dan mempunyai tekanan lebih besar daripada tekanan atmosfer. Air yang mengalir (*no flux*) pada lapisan pembatasnya, karena *confined aquifer* merupakan akuifer yang jenuh air yang dibatasi oleh lapisan atas dan bawahnya.

#### 2.4.2 Akuiklude (*Aquiclude*)

Suatu lapisan, formasi atau kelompok formasi satuan geologi yang *impermeable* dengan nilai hidraulik yang sangat kecil sehingga tidak memungkinkan air melewatinya. Dapat dikatakan juga lapisan pembatas atas dan bawah suatu akuifer tertekan.

#### 2.4.3 Akuitar (*Aquitard*)

Suatu lapisan, formasi atau kelompok formasi satuan geologi yang *permeable* dengan nilai konduktivitas hidrolis kecil namun masih memungkinkan air melewati lapisan ini walaupun dengan gerakan lambat. Dapat dikatakan juga merupakan lapisan pembatas atas dan bawah dari *semi confined/unconfined aquifer*.

## 2.5 Hubungan Resistivitas dengan Akuifer

Ada faktor yang mempengaruhi hubungan antara nilai resistivitas dengan jenis batuan menurut (Daulay, 2011) yaitu:

1. Batuan sedimen yang lepas mempunyai nilai resistivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan batuan sedimen yang kompak. Batuan yang mengandung air akan lebih rendah nilai resistivitasnya.
2. Porositas batuan. Batuan yang tidak *porous* mempunyai nilai resistivitas lebih tinggi dari batuan yang *porous*.

3. pH air di dalam rongga batuan. Batuan yang asam dengan nilai resistivitas rendah menunjukkan pH rendah.
4. Nilai resistivitas batuan akan bervariasi berdasarkan lingkungan pengendapan setempat.
5. Nilai resistivitas dapat berbeda secara mencolok, tidak saja dari satu lapisan kelapisan yang lain tetapi dalam satu lapisan batuan.
6. Temperatur air lebih rendah (segar) mempunyai nilai resistivitas tinggi dibandingkan temperatur air tinggi (air panas).
7. Permeabilitas adalah kesanggupan batuan untuk meloloskan fluida.
8. Porositas batuan adalah ukuran dari ruang kosong di antara material dengan perbandingan antara volume rongga dengan volume batuan seluruhnya  $V_v/V_T \times 100 \%$ .