

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Teori Medan Elektromagnetik

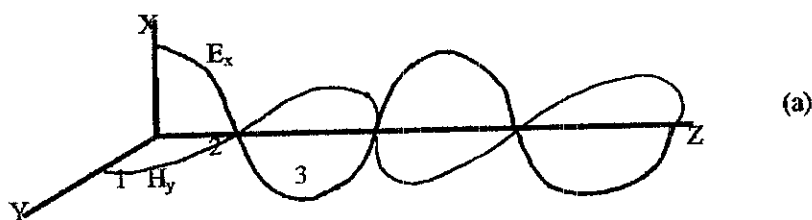
Adanya distribusi muatan yang berubah terhadap waktu, atau variasi arus listrik dapat membangkitkan medan elektromagnet. Asumsi yang digunakan dalam penurunan rumus-rumus pada metode magnetotelurik secara umum adalah bahwa gelombang diasumsikan sebagai gelombang datar.

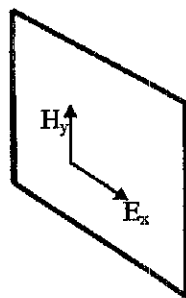
Yang dimaksud gelombang datar adalah gelombang yang hanya berubah dalam arah penjarangan gelombang, dan konstan pada bidang yang tegak lurus dalam arah penjarangannya. (Elmore, Heald, 1969)

Sifat-sifat dari gelombang datar tersebut antara lain :

- Jika gelombang datar berpropagasi dalam arah z , maka H dan E akan bervariasi secara sinusoidal terhadap z (gambar 2.1a).
- Medan magnet H dan medan listrik E mempunyai harga yang konstan pada bidang yang tegak lurus dengan sumbu z (gambar 2.1b).

Pada gambar 2.1a dititik 1 dan 3 harga E_x dan H_y mencapai maksimum sedangkan dititik 2 berharga nol.





(b)

Gambar 2.1. Sifat gelombang datar
(Elmore, Heald, 1969)

2.2. Persamaan Gelombang Elektromagnetik (Hohmann, 1980)

Persamaan gelombang EM didapat dari persamaan Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2-01)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2-02)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (2-03)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2-04)$$

dengan:

E = vektor medan listrik (volt/m)

B = vektor induksi magnetik (weber/m² atau tesla)

H = vektor medan magnet (ampere/m)

j = vektor rapat arus (ampere/m²)

D = vektor perpindahan listrik (coulomb/m²)

Persamaan yang menghubungkan sifat fisik medium dengan medan yang timbul pada medium tersebut dapat dinyatakan oleh:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2-05)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2-06)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} \quad (2-07)$$

dengan:

μ = permeabilitas magnetik (henry/m)

ε = permitivitas listrik (farad/m)

σ = konduktivitas (ohm^{-1}/m)

ρ = tahanan jenis (ohm.meter)

Dengan mengasumsikan bahwa sifat fisik medium tidak bervariasi terhadap waktu dan posisi (homogen isotropis), maka persamaan (2.03) berharga nol jika tidak ada suatu sumber muatan dalam suatu medium yang ditinjau, sehingga persamaan Maxwell dapat dituliskan kembali sebagai (Hohmann, 1980):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.08)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.09)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.11)$$

Dengan melakukan operasi curl pada persamaan (2.08) dan (2.09) serta dengan mensubstitusikan besaran-besaran yang ada, maka kita akan dapatkan persamaan gelombang untuk medan listrik dan medan magnet. Dengan menggunakan identitas vektor, maka akan didapatkan persamaan gelombang untuk medan magnet dan medan listrik sebagai berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Persamaan (2.12) dan (2.13) diatas merupakan persamaan gelombang yang merupakan fungsi dari jarak dan waktu. Jika variasi terhadap waktu dinyatakan sebagai fungsi dari sinusoidal maka:

$$E_{(r,t)} = E_0(r) e^{i\omega t} \quad (2.14)$$

$$H_{(r,t)} = H_0(r) e^{i\omega t} \quad (2.15)$$

dengan:

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = \text{frekuensi gelombang EM (Hz)}$$

2.3. Absorpsi Gelombang Bidang Dan *Skin Depth* (Dobrin dkk, 1988)

Dengan memperhatikan hubungan pada persamaan (2.14) dan (2.15), maka persamaan (2.12) dan (2.13) dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.17)$$

konstanta atau bilangan k didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned} k^2 &= \mu\varepsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega = \mu\omega(\varepsilon\omega - i\sigma), \text{Re}(k) > 0 \\ &= -i\mu\omega(\sigma + i\omega\varepsilon), \text{Im}(k) < 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$k = \alpha - i\beta = [-i\mu\omega(\sigma + i\omega\varepsilon)]^{1/2} \quad (2.19)$$

Konstanta α merupakan konstanta fase yaitu:

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + (\sigma/\epsilon\omega)^2} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

Konstanta atenuasi β diberikan oleh:

$$\beta = \omega \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + (\sigma/\epsilon\omega)^2} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

Konduktivitas batuan merupakan parameter penentu dalam penentuan struktur bawah tanah. *Quation Static Limited Condition* terjadi jika konduktivitas batuan cukup besar, dimana umumnya terjadi anomali geofisika. Biasanya material bumi mempunyai harga konduktivitas $\sigma > 10^{-4} \text{ (ohm m)}^{-1}$ permitivitas $\epsilon < 10^{-11} \text{ F m}^{-1}$. Untuk frekuensi dibawah 100 Hz, $\sigma \gg \epsilon\omega$ sehingga $\epsilon\omega$ dapat diabaikan pada pendekatan kuasi statik ini.

Pada kasus ini $\alpha = \beta$ dan konstanta propagasi k adalah:

$$k = (1-i) \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}} \quad (2.22)$$

Selain bersifat konduktif, material bumi ada juga yang bersifat resistif. Untuk kasus ini maka harga $\sigma \ll \epsilon\omega$ sehingga konstanta propagasi akan menjadi:

$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (2.23)$$

Untuk selanjutnya karena dalam eksplorasi geofisika *Quation Static Limited Condition* ini yang diharapkan, maka kita akan menggunakan pendekatan kondisi ini, sehingga harga konstanta propagasi yang digunakan adalah menurut persamaan (2.22).

Besaran *skin depth* adalah suatu besaran yang menyatakan kedalaman pada suatu medium homogen yang pada kedalaman itu amplitude gelombang EM akan

berkurang sehingga menjadi i/e ($\approx 35\%$) dari amplitudo di permukaan. Pada *Quation Static Limited Condition* besaran tersebut dinyatakan sebagai:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \quad (2.24)$$

Dengan menganggap harga μ sama dengan harga μ di ruang hampa maka $\mu = \mu_0 = 1,256 \times 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$, sehingga persamaan diatas dapat ditulis sebagai:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.25)$$

dengan:

- f = frekuensi gelombang EM (Hz)
- δ = *skin depth* (m)
- ρ = resistivitas medium homogen (ohm.m)

2.4. CSAMT (*Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics*)

Metode CSAMT merupakan teknik sounding EM dalam domain frekuensi dengan menggunakan sumber buatan berupa arus AC yang diinjeksikan ke dalam bumi melalui dipole atau loop horisontal. Frekuensi yang digunakan berada pada kisaran frekuensi audio yaitu 0,125 hz hingga 8192 hz (Zonge, 1990). Metode CSAMT pada prinsipnya sama dengan metode MT/AMT. Keuntungan penggunaan sumber buatan diantaranya adalah sinyal yang dihasilkan lebih kuat dan stabil sehingga pengukuran dapat dilakukan setiap saat. Hal ini akan lebih ekonomis daripada yang menggunakan sumber alam. Namun dengan adanya efek sumber, interpretasi CSAMT lebih kompleks.

Kedalaman deteksi/investigasi metode ini tidak hanya tergantung pada *skin depth*, tapi merupakan fungsi dari resistivitas, noise listrik dan sensitivitas alat. Resolusi lateral metode-metode EM yang lain pada umumnya dibatasi oleh jarak transmitter dan receiver. Jika jarak bertambah maka resolusi akan berkurang. Pada metode CSAMT resolusi lateral akan bergantung pada panjang dipole transmitter yang dapat diatur sesuai dengan besarnya target tanpa pengurangan kedalaman penetrasi.

Pada survei lapangan, geometri transmitter-receiver menimbulkan tiga efek yaitu (Yamashita, 1984):

- Efek *non plane wave* : disebabkan oleh jarak transmitter-receiver yang terlalu dekat.
- Efek *source overprint*: disebabkan oleh pengaruh geologi dibawah posisi transmitter.
- Efek *shadow*: menyebabkan seolah-olah badan anomali lebih besar daripada yang sebenarnya.

Koreksi dapat dilakukan dalam tiga cara yaitu :

- a. Menormalisasi semua data yang diperoleh pada suatu profil frekuensi demi frekuensi. Rata-rata resistifitas semu pada suatu frekuensi digunakan untuk membagi (menormalisasi) resistifitas pada frekuensi untuk setiap titik sounding pada profil. Kemudian proses yang sama diulangi untuk frekuensi lainnya, tetap dengan menggunakan data-data pada titik sounding tersebut (Zonge, dkk, 1990). Harga resistifitas ternormalisasi yang sudah tidak memiliki satuan dapat dikonfersikan ke dalam satuan resistifitas dengan mengalikannya dengan suatu harga resistifitas representatif tertentu.

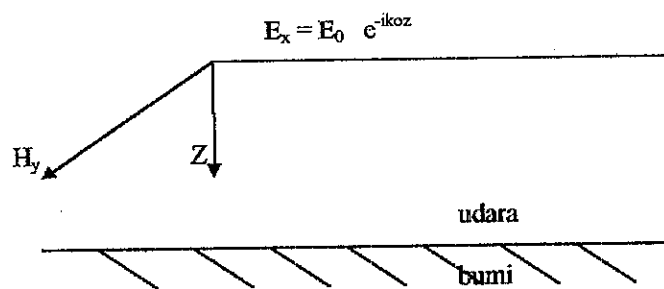
- b. Teknik koreksi yang kedua adalah dengan menghitung impedansi secara langsung berdasarkan data jarak r terkecil yang telah diketahui sebagai pengganti perhitungan dengan menggunakan persamaan Cagniard. (Yamashita, 1984).
- c. Teknik koreksi yang ketiga memerlukan pengukuran yang tidak terpengaruh oleh efek *non-plane wave*. Pada teknik koreksi ini metode CSAMT dilakukan untuk daerah *Far Field*, sedangkan untuk daerah *Near Field* digunakan teknik pengukuran yang sama dengan metoda MT/ AMT.

2.5. Impedansi Gelombang pada Medium Homogen Isotropis

Impedansi gelombang merupakan besaran yang menyatakan perbandingan antara medan listrik dan medan magnet. Untuk medium 1D, maka resistivitas hanya bervariasi terhadap kedalaman saja. Hal ini dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut (Hohmann, 1980):

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= (E_x, 0, 0) \\ \mathbf{H} &= (0, H_y, 0) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Medium homogen isotropis (*half space*) adalah suatu medium yang gelombangnya berjalan sama ke segala arah. Medium ini paling sederhana untuk memodelkan struktur bawah tanah permukaan. Untuk kasus normal gelombang akan datang secara tegak lurus ke permukaan bumi (Hohmann, 1980).



Gambar 2.2. Bentuk Geometri Medium Homogen Isotropis (Hohmann, 1980)

Gelombang bidang yang datang di permukaan bumi akan mengalami pemantulan (refleksi) dan penerusan (transmisi), sehingga didapatkan persamaan gelombang di udara dan di dalam bumi (Elmore dkk, 1969). Konfigurasi gelombang bidang diatas bumi homogen isotropis dapat dilihat pada gambar 2.2. Gelombang datang mempunyai persamaan-persamaan:

di udara:

$$E_x = E_0 e^{-ik_0 z} + E_0 e^{ik_0 z} \quad (2.27)$$

(datang) (pantul)

di dalam bumi:

$$E_x = E_1 e^{-ik_1 z} \quad (2.28)$$

(transmisi)

dengan :

$$k_0 = \omega (\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}$$

$$k_1 = \left[\frac{\mu \omega}{\rho} \right]^{1/2} e^{-i\pi/4}$$

E_0 dan E_1 merupakan konstanta.

Dalam penurunan impedansi gelombang bidang pada medium isotropis, kita tinjau kembali persamaan Maxweell yaitu persamaan (2.04). Dari penurunan persamaan

tersebut dengan mensubstitusikan induksi medan magnet B ke dalam medan H akan di dapatkan:

$$H_y = \frac{1}{i\omega\epsilon_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (2.29)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.28) ke dalam (2.29) akan diperoleh:

$$H_y = E_1^+ \frac{k_1}{\omega\mu_0} e^{-ik_1 z} \quad (2.30)$$

dan impedansi permukaan Z untuk medium ini adalah:

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu_0}{k_1} \quad (2.31)$$

2.6. Resistivitas Semu

Dalam metode-metode EM, hasil akhir yang diharapkan adalah besarnya resistivitas semu dari perlapisan yang ada. Berdasarkan harga resistivitas semu tersebut, maka dapat terlihat berbeda dengan resistivitas batuan sehingga dapat diduga bentuk struktur yang ada (Dobrin dkk, 1988).

Resistivitas semu adalah resistivitas yang terukur diatas permukaan medium yang berlapis-lapis, yang mempunyai perbedaan-perbedaan resistivitas dan ketebalan, yaang pada lapisan tersebut diasumsikan homogen isotropis. Jika resistivitas semu berubah terhadap kedalaman maka model yang digunakan untuk menggambarkan kondisi ini adalah metode 1D.

Untuk bumi homogen harga impedansi Z adalah (Hohmann, 1980):

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\omega\mu_0\rho} \cdot e^{i\pi/4} \quad (2.32)$$

Untuk selanjutnya impedansi bumi homogen disebut impedansi intrinsik. Impedansi kompleks dapat dinyatakan sebagai besaran amplitude dan fase. Dalam praktek tersebut lebih sering dinyatakan dalam bentuk tahanan jenis dan fase sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z|^2 \quad (2.33)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z} \right] \quad (2.34)$$

