

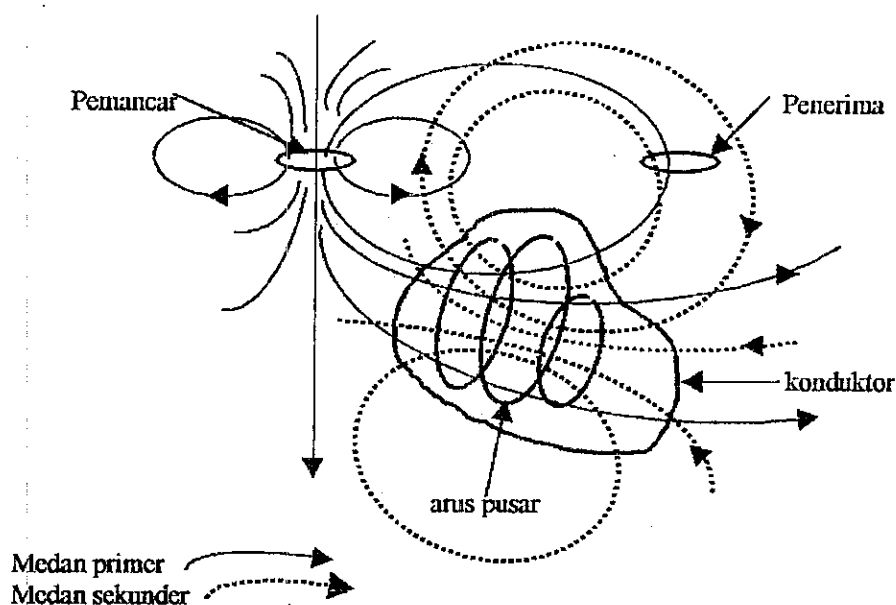
BAB II

DASAR TEORI

2.1. Metoda Elektromagnetik

Metoda elektromagnetik merupakan metoda eksplorasi geofisika yang menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mempengaruhi medium di sekitarnya. Gelombang elektromagnetik dapat ditimbulkan dengan cara mengalirkan arus bolak-balik melalui suatu kumparan yang berfungsi sebagai pemancar. Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh pemancar ini akan mempengaruhi medium di sekitarnya sehingga dalam medium akan timbul arus pusar (*eddy current*). Arus pusar yang timbul dari medium, menimbulkan medan elektromagnetik sekunder yang dapat terukur di permukaan (Grant dan West, 1965).

Suatu kumparan penerima yang dipasang di permukaan akan menerima gelombang elektromagnetik primer ($\bar{H}_p$) yaitu gelombang yang langsung dari pemancar dan juga gelombang elektromagnetik sekunder ($\bar{H}_s$) yang berasal dari medium atau konduktor. Besarnya arus pusar yang timbul merupakan fungsi konduktivitas listrik dari medium. Makin besar harga konduktivitas medium maka makin besar pula arus pusarnya sehingga dengan menganalisis sifat-sifat gelombang sekunder ini akan diperoleh informasi mengenai konduktivitas listrik dari medium (Telford dkk, 1974). Gambaran secara umum dari metoda elektromagnetik disajikan pada Gambar 2.1.



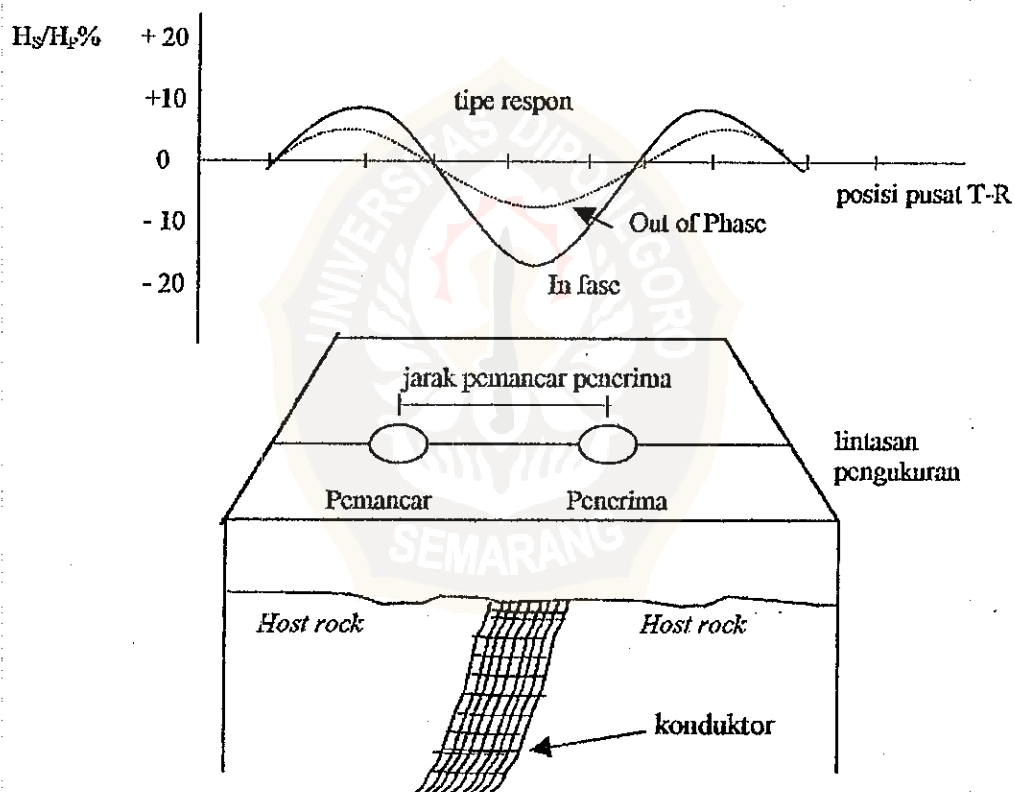
Gambar 2.1. Gambaran Umum Metoda Elektromagnetik
(Grant dan West, 1965)

2.2. Metoda Elektromagnetik Simpal Horisontal

Metoda simpal horisontal (*horizontal loop*) dinamakan juga metoda Slingram. Peralatan utama metoda ini terdiri dari sebuah pemancar dan sebuah penerima yang berupa kumparan kawat berbentuk lingkaran (*loop*) yang letaknya terhadap bidang permukaan tanah adalah horisontal atau mendatar dengan sumbu kumparan arahnya vertikal. Di lapangan, kumparan pemancar dan penerima mempunyai ukuran diameter 2-3 ft atau sekitar 61 – 91 cm (Telford dkk, 1974). Pemancar dan penerima keduanya bergerak bersama-sama secara serentak dengan jarak pisah yang tetap. Di lapangan jarak pemancar dengan penerima yaitu antara 20m sampai 100m dan pemancar menggunakan frekuensi antara 1.000-5.000 Hz (Ketola dan Puranen, 1980).

Medan yang dipancarkan oleh pemancar, sebagian diterima oleh kumparan penerima yang disebut medan primer. Kumparan lain yang ditempatkan pada

kumparan pemancar, juga akan menerima medan yang dipancarkan dari pemancar. Kumparan ini mempunyai ukuran yang lebih kecil dari kumparan pemancar dan penerima sehingga pengaruh induksi timbal balik terhadap pemancar dan penerima dapat diabaikan dan dianggap mempunyai selisih fase yang tetap dengan pemancar dan amplitudo yang sebanding sehingga dapat digunakan sebagai referensi, yang selanjutnya disebut kumparan referensi (Ibrahim, 1979). Sistem pengukuran metoda simpal horisontal disajikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Sistem Pengukuran Metoda Simpal Horisontal
(Grant dan West, 1965)

Kumparan penerima dan kumparan referensi dihubungkan pada rangkaian kompensator yang berfungsi untuk membandingkan medan sekunder dengan medan primer dan untuk memisahkan medan sekunder menjadi dua bagian yaitu,

In-Phase (IP) dan *Out-of Phase (OP)* (Grant dan West, 1965). Hasil pengukuran ditampilkan dalam perbandingan (nisbah) antara medan sekunder dengan medan primer (H_s/H_p) dalam prosen (%) sebagai ordinat (sumbu y) dengan pusat antara pemancar-penerima sepanjang lintasan pengukuran (*tranverse*) sebagai absisnya (sumbu x).

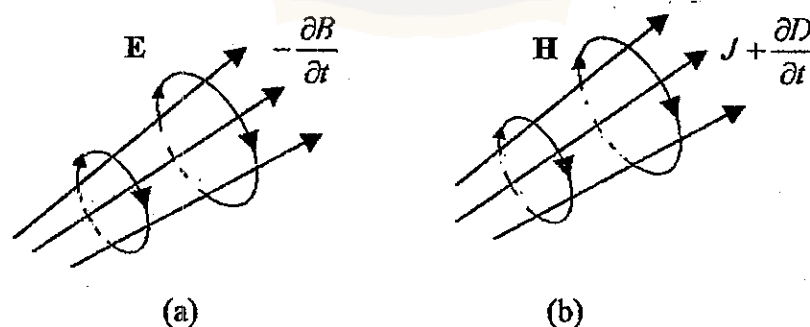
2.3. Persamaan Maxwell

Sebagai dasar dari metoda induksi elektromagnetik adalah mengenai penjalaran dan peredaman gelombang elektromagnetik dalam medium yang dinyatakan dalam persamaan – persamaan Maxwell tentang medan listrik dan medan magnet sebagai berikut (Grant dan West, 1965):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-2)$$

Kedua persamaan Maxwell tersebut dapat digambarkan pada Gambar 2.3 sebagai berikut:



Gambar 2.3
Medan Listrik dan Medan Magnet
(a). Hukum Faraday, (b). Hukum Ampere
(West dan Macnae, 1992)

dengan:

$\vec{J}$ adalah Rapat Arus (A/m^2)

$\vec{E}$ adalah Intensitas Medan Listrik (V/m)

$\vec{B}$ adalah Rapat Fluks Magnet ($Weber/m^2$)

$\vec{H}$ adalah Intensitas Medan Magnet ($amp.turn/m^2$)

$\vec{D}$ adalah Pergeseran Listrik (C/m^2)

Persamaan (2-1) adalah pernyataan dari hukum Faraday, yang menyatakan bahwa bila dalam suatu daerah terdapat medan magnet $\vec{B}$ yang berubah terhadap waktu maka di situ akan timbul medan listrik yang besarnya $\vec{E}$. Sedangkan persamaan (2.2) adalah pernyataan mengenai hukum Ampere, yang menyatakan bahwa bila di suatu daerah ada arus listrik maka di situ akan timbul medan magnet yang besarnya $\vec{H}$.

Dengan menggunakan identitas vektor dan substitusi pada persamaan – persamaan Maxwell, maka didapatkan persamaan gelombang elektromagnetik yang merambat pada medium yang mempunyai konduktivitas (daya hantar) σ , permeabilitas relatif dari medium μ dan konstanta dielektrikum ϵ , sebagai berikut (Telford dkk, 1974):

$$\nabla^2 \vec{E} = j\omega\mu\sigma\vec{E} - \omega^2\epsilon\mu\vec{E} \quad (2.3)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = j\omega\mu\sigma\vec{H} - \omega^2\epsilon\mu\vec{H} \quad (2.4)$$

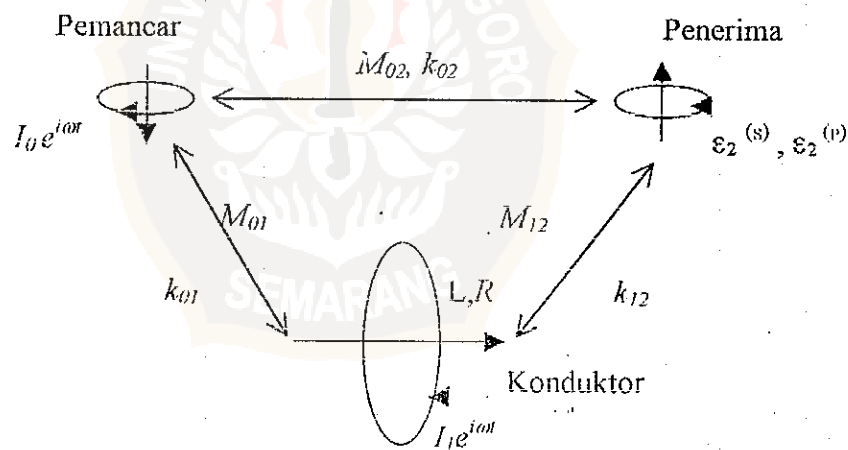
Apabila gelombang elektromagnetik merambat melalui medium bukan ruang hampa, maka gelombang elektromagnetik akan mengalami peredaman sehingga persamaan gelombang elektromagnetik dalam konduktor adalah (Telford dkk, 1974):

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - j\omega\mu\sigma \bar{E} \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \bar{H} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - j\omega\mu\sigma \bar{H} \quad (2.6)$$

2.4. Induktansi Timbal Balik antara Pemancar, Konduktor dan Penerima

Dengan menganggap sistem pada Gambar (2.1) di atas sebagai sistem tiga kumparan, yaitu kumparan pertama sebagai pemancar (0), kumparan kedua sebagai konduktor (1) dan kumparan ketiga sebagai penerima (2), maka dapat dijelaskan induksi timbal balik antara pemancar dan konduktor (M_{01}), konduktor dan penerima (M_{12}) serta pemancar dan penerima (M_{02}) dengan menggambarkan rangkaian ekuivalen sistem kopel induktansi seperti pada Gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2.4
Rangkaian Ekuivalen Sistem Kopel Induktansi Timbal Balik
(Grant dan West, 1965)

Dari Gambar 2.4 tersebut di atas dapat diterangkan sebagai berikut, apabila di dalam pemancar diberi arus bolak-balik sebesar $I_0 e^{j\omega t}$, maka arus ini akan menimbulkan medan elektromagnetik primer yang diterima oleh rangkaian

penerima dan juga akan menginduksi konduktor yang akan menimbulkan arus pusar dan arus ini akan menimbulkan medan magnet sekunder yang diterima oleh penerima.

Besarnya induksi di penerima yang disebabkan oleh medan primer adalah (Grant dan West, 1965):

$$\varepsilon_2^{(p)} = -M_{02} \frac{d}{dt} I_0 e^{i\omega t} \quad (2.7)$$

sedangkan GGL induksi di konduktor :

$$\varepsilon_1 = -M_{01} \frac{d}{dt} I_0 e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

GGL yang disebabkan oleh medan sekunder yang ada di penerima adalah:

$$\varepsilon_2^{(s)} = -M_{12} \frac{d}{dt} I_1 e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

Dengan demikian respon dari sistem tersebut di atas dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\varepsilon_2^{(s)}}{\varepsilon_2^{(p)}} = \frac{-i\omega M_{12} I_1 e^{i\omega t}}{-i\omega M_{02} I_0 e^{i\omega t}} \quad (2.10)$$

$$\frac{\varepsilon_2^{(s)}}{\varepsilon_2^{(p)}} = -\frac{M_{01} M_{12}}{M_{02} L} \left[\frac{i(\omega L / R)(1 - i\omega L / R)}{1 + (\omega L / R)^2} \right] \quad (2.11)$$

$$\frac{\varepsilon_2^{(s)}}{\varepsilon_2^{(p)}} = -\frac{M_{01} M_{12}}{M_{02} L} \left[\frac{\alpha^2 + i\alpha}{1 + \alpha^2} \right] \quad (2.12)$$

dengan $\alpha = \omega L / R$

dengan L adalah induktansi diri

ω adalah frekuensi angular

R adalah resistansi

Induktansi bersama dapat juga dinyatakan sebagai fungsi induktansi diri yaitu (Telford dkk, 1974):

$$M_{01} = k_{01} (L_1 L_0)^{1/2}, M_{12} = k_{12} (L_1 L_2)^{1/2}, M_{02} = k_{02} (L_0 L_2)^{1/2} \quad (2.13)$$

dengan:

k_{01} adalah koefisien kopel antara pemancar dan konduktor

k_{02} adalah koefisien kopel antara pemancar dan penerima

k_{12} adalah koefisien kopel antara konduktor dan penerima

L_0 adalah induktansi pemancar

L_1 adalah induktansi konduktor

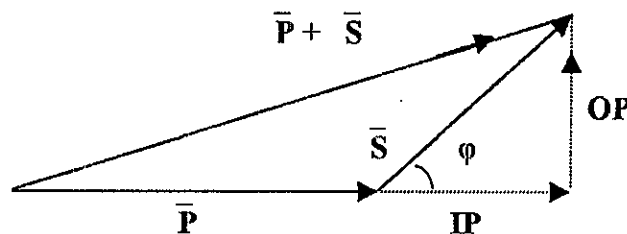
L_2 adalah induktansi penerima

sehingga persamaan 2.12 dapat dituliskan (Telford dkk, 1974):

$$\frac{\varepsilon_2^{(s)}}{\varepsilon_2^{(p)}} = -\frac{k_{01}k_{12}}{k_{02}} \left[\frac{\alpha^2 + i\alpha}{1 + \alpha^2} \right] \quad (2.14)$$

2.5. Komponen – Komponen Medan Induksi

Di dalam konduktor, gelombang elektromagnetik mengalami pergeseran fase. Besarnya pergeseran fase tergantung pada besarnya sifat kelistrikan dari konduktor yaitu tahanan dan induktansi (Telford dkk, 1974). Oleh karena itu jumlah induksi primer dan induksi sekunder merupakan penjumlahan secara vektor, seperti terlihat pada Gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5.
Diagram vektor komponen-komponen medan induksi
(Poddar and Bhattacharya, 1966)

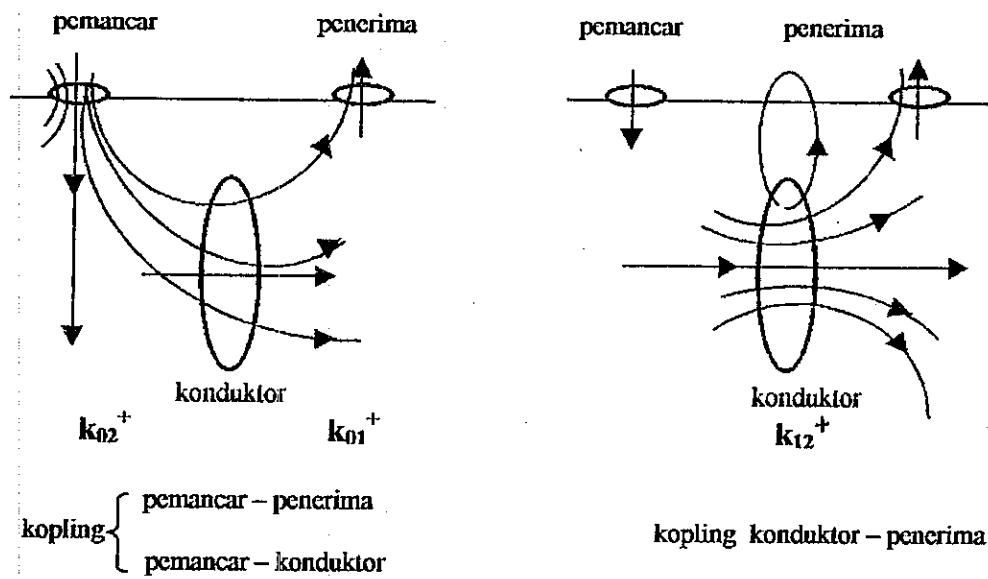
Pada Gambar 2.5 di atas dapat diterangkan bahwa $\bar{P}$ adalah medan primer, yaitu medan yang diterima oleh kumparan penerima jika kumparan terletak jauh dari konduktor, $\bar{S}$ adalah medan sekunder yang tertangkap oleh penerima, yaitu medan yang dihasilkan oleh arus pusar yang terjadi pada konduktor dan $\bar{P} + \bar{S}$ yang merupakan resultan dari medan primer dan medan sekunder yang diterima oleh penerima, sedangkan ϕ adalah pergeseran fase medan sekunder.

Dari diagram vektor tersebut di atas, maka medan sekunder dapat dipisahkan menjadi dua bagian, yaitu yang sefase dengan medan primer yang disebut **IP** (*In Phase*) dan yang berbeda fase sebesar 90° terhadap medan primer yang disebut **OP** (*Out of Phase*).

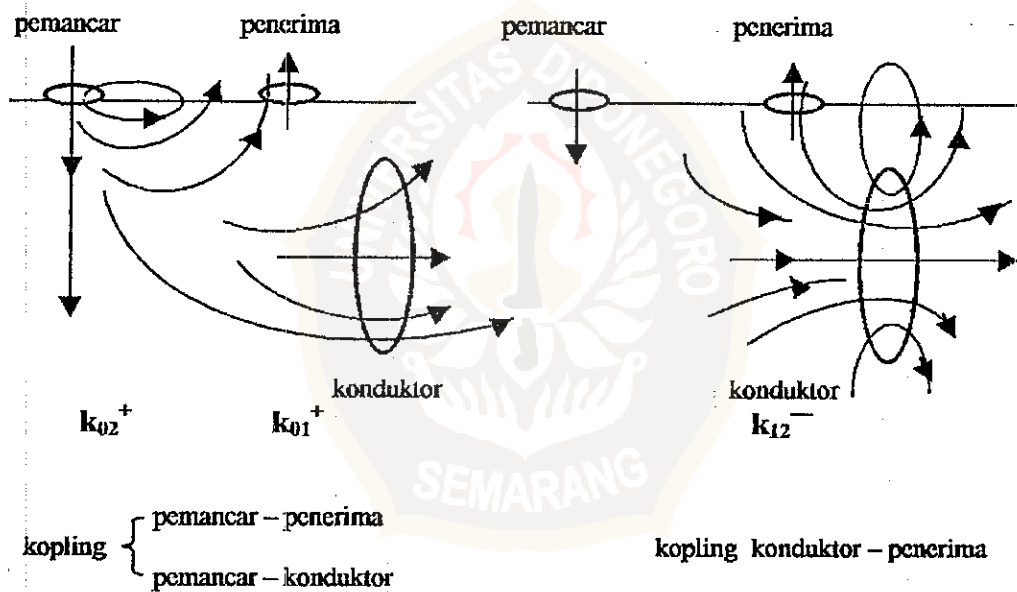
2.6. Koefisien Penggandeng (*Coupling Coefficient*)

Koefisien penggandeng atau koefisien kopling adalah suatu nilai yang menunjukkan hubungan induksi timbal balik antara pemancar, konduktor dan penerima (Janto, 1976). Dari persamaan (2.14) yang menyatakan nilai perbandingan medan sekunder dengan medan primer, bagian pertama dari ruas sebelah kanan disebut koefisien penggandeng.

Pada Gambar 2.4. di atas dapat dilihat bahwa antara pemancar-konduktor, pemancar-penerima dan konduktor-penerima mempunyai koefisien kopling masing-masing k_{01} , k_{12} , k_{02} . Koefisien kopling tersebut tandanya akan berubah tergantung dari posisi antara pemancar, penerima dan konduktor. Hal tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 2.6 berikut.



(a). Sistem mengapit konduktor



(b) Sistem berada di sebelah konduktor

Gambar.2.6. Koefisien Kopling Sistem Simpal Horizontal
(Grant dan West, 1965)

Dari Gambar 2.6, dapat diterangkan sebagai berikut (Grant dan West, 1965):

1. Tanda k_{02} , yaitu koefisien penggandeng antara pemancar-penerima nilainya akan selalu tetap positif. Hal ini disebabkan karena jarak antara pemancar – penerima tidak berubah selama keduanya bergerak.
2. Ketika pemancar dan penerima letaknya mengapit konduktor maka k_{01} dan k_{12} akan bertanda sama.
3. Ketika salah satu koil berada di atas konduktor maka koefisien penggandeng akan menjadi hilang.
4. Dan ketika kedua koil pemancar dan penerima letaknya berada di samping konduktor maka tandanya berlawanan.

Dengan demikian respon akan mulai positif ketika pemancar dan penerima keduanya berada di sebelah konduktor dan akan berubah negatif sepanjang kedua koil mengapit konduktor. Respon akan kembali positif setelah kedua koil melewati puncak konduktor.

2.7. Parameter Respons

Parameter respon adalah variabel yang menentukan besarnya nilai respon yang digunakan untuk interpretasi metoda induksi elektromagnetik. Nilai parameter respon tergantung dari bentuk konduktor. Menurut Nair dkk (1968), parameter respon untuk konduktor berbentuk lempeng tipis adalah:

$$\lambda/a = 10^5 \rho/a \text{ ft} \quad (2.15)$$

dengan:

ρ adalah resistivitas lempeng ($\Omega \cdot \text{cm}$)

a adalah jarak pemancar penerima (m)

f adalah frekuensi pemancar (Hz)

t adalah tebal lempeng (m)

2.8. Teori Model Skala Laboratorium

Permodelan skala laboratorium adalah tiruan atau *simulasi* dari keadaan lapangan dalam ukuran laboratorium dengan bentuk dan model geologi yang lebih sederhana dan ideal. Hal ini terutama dimaksud untuk mendapatkan kurva respon dalam berbagai keadaan lapangan yang dimodelkan sehingga berguna dalam interpretasi dan perbandingan hasil pengukuran di lapangan.

Untuk membuat model laboratorium diperlukan faktor skala yang menunjukkan perbandingan antara model dengan lapangan. Menurut Telford (1974), untuk mendapatkan nilai faktor skala tersebut dapat dimulai dari persamaan 2.4, yang menggambarkan persamaan gelombang elektromagnetik yang menjalar pada suatu medium sebagai berikut:

$$\nabla^2 \cdot \vec{H} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \vec{H} = \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) = j \omega \mu \sigma \vec{H} = 2\pi j f \mu \sigma \vec{H} \quad (2.16)$$

Selanjutnya tanda lapangan di singkat 'lap' dan sistem model laboratorium di singkat 'mod'. Jika L dan f masing-masing besaran panjang atau jarak dan frekuensi, maka perbandingannya harus mengikuti aturan sebagai berikut:

$$\frac{L_{\text{mod}}}{L_{\text{lap}}} = \frac{X_{\text{mod}}}{X_{\text{lap}}} = \frac{Y_{\text{mod}}}{Y_{\text{lap}}} = \frac{Z_{\text{mod}}}{Z_{\text{lap}}} \quad \text{dan} \quad \frac{t_{\text{mod}}}{t_{\text{lap}}} = \frac{f_{\text{mod}}}{f_{\text{lap}}} \quad (2.17)$$

dari persamaan 2.16 dapat dituliskan:

$$\nabla^2 H_{\text{mod}} = 2\pi j f_{\text{mod}} \sigma_{\text{mod}} \mu_{\text{mod}} H_{\text{mod}} \quad (2.18a)$$

$$\nabla^2 H_{\text{lap}} = 2\pi j f_{\text{lap}} \sigma_{\text{lap}} \mu_{\text{lap}} H_{\text{lap}} \quad (2.18b)$$

selanjutnya akan diperoleh persamaan yang berbentuk:

$$\nabla^2 H_{\text{mod}} = \left(\frac{L_{\text{lap}}}{L_{\text{mod}}} \right) \nabla^2 H_{\text{lap}} = \left(\frac{f_{\text{mod}} \cdot \mu_{\text{mod}} \cdot \sigma_{\text{mod}}}{f_{\text{lap}} \cdot \mu_{\text{lap}} \cdot \sigma_{\text{lap}}} \right) \nabla^2 H_{\text{lap}} \quad (2.19)$$

sehingga didapatkan:

$$\frac{\rho_{\text{mod}}}{\rho_{\text{lap}}} = \frac{f_{\text{mod}} \cdot \mu_{\text{mod}}}{f_{\text{lap}} \cdot \mu_{\text{lap}}} \left(\frac{L_{\text{mod}}}{L_{\text{lap}}} \right)^2 \quad (2.20)$$

Perbandingan $(\rho / \mu f L^2)$ adalah sama untuk kedua sistem (lapangan dan model) dan perbandingan permeabilitas diabaikan karena biasanya permeabilitas magnetik tidak bervariasi (Telford dkk, 1974), sehingga jika dituliskan $(L_{\text{mod}}/L_{\text{lap}})=1/n$ dengan $n \gg 1$, maka akan didapatkan bentuk akhir dari persamaan skala, yaitu:

$$\left(\frac{\rho_{\text{lap}}}{\rho_{\text{mod}}} \right) \left(\frac{f_{\text{mod}}}{f_{\text{lap}}} \right) = n^2 \quad (2.21)$$

dengan:

ρ_{Lap} adalah resistivitas konduktor (mineral) lapangan

ρ_{mod} adalah resistivitas model (lempeng)

f_{Lap} adalah frekuensi pemancar di lapangan

f_{mod} adalah frekuensi pemancar model

n adalah faktor skala