

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

Metode elektromagnetik merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk survey awal di permukaan pada daerah pengukuran yang mengandung mineral atau bahan-bahan yang mempunyai daya hantar listrik yang baik misalnya bijih logam, sedimen tipis yang konduktif.

Salah satu metode elektromagnetik yang digunakan di sini adalah metode “elektromagnetik horisontal loop”. Metode ini pertama kali digunakan oleh Slingram dan Ronka, berkembang di Swedia dan populer di Amerika Utara sejak tahun 1958.

Metode elektromagnetik horisontal loop merupakan salah satu metode geofisika yang pengoperasiannya cepat, praktis, transmisinya bersifat portable (mudah dipindah), menggunakan frekuensi audio 5 sampai 25 kHz. dan biayanya relatif murah sehingga cocok untuk penelitian awal.

Metode elektromagnetik horisontal loop terdiri dari tiga rangkaian listrik, yaitu transmiter, receiver dan konduktor. Transmitter dan receivernya berbentuk coil yang diletakkan mendatar pada permukaan, model konduktor atau mineral penyebab anomali dalam penelitian ini berbentuk lempeng

tipis. Dengan menggunakan prinsip induksi gelombang elektromagnetik dapat menjelaskan prinsip metode elektromagnetik horisontal loop.

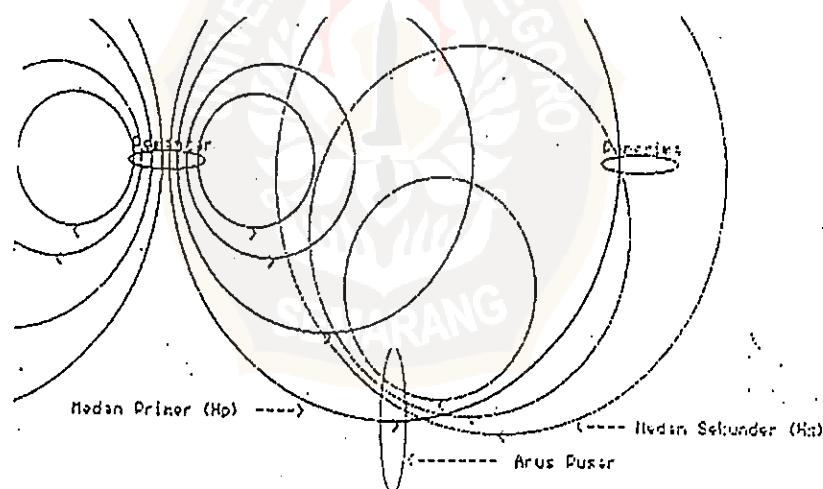
Perhitungan metode ini menggunakan persamaan anomali sintetis (dengan memasukkan geometri) untuk komponen real dan komponen imajiner. Dari persamaan anomali tersebut akan diperoleh kurva anomali dan kemudian dicari kaitan kurva anomali dengan geometri. ( Telford, 1974 )

## **2.1. PRINSIP METODE ELEKTROMAGNETIK ( Telford, 1974 )**

Metode elektromagnetik menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mempengaruhi medium disekitarnya (tanah, batuan) dan mengukur medan sekunder yang ditimbulkan oleh medium tersebut. Gelombang elektromagnetik ditimbulkan dengan cara mengalirkan arus bolak-balik melalui suatu kumparan kawat. Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh kumparan kawat (transmitter) ini akan mempengaruhi medium disekitarnya, sehingga dalam medium akan timbul arus pusaran (eddy current). Besarnya arus eddy merupakan fungsi konduktifitas listrik dari medium batuan, makin besar harga konduktifitas makin besar pula arus pusarannya. Arus yang timbul dalam medium ini akan menimbulkan medan elektromagnetik sekunder ( $H_s$ ) yang dapat diukur di permukaan oleh receiver. Receiver yang dipasang di permukaan akan menerima gelombang elektromagnetik primer ( $H_p$ ) yang langsung dari

transmitter dan gelombang yang berasal dari medium ( $H_s$ ), gelombang sekunder ini besarnya tergantung dari konduktivitas listrik medium, maka dengan menganalisa sifat gelombang sekunder akan diperoleh informasi mengenai konduktivitas listrik dari medium atau batuan.

Sifat yang penting dari gelombang sekunder adalah amplitudo dan beda fasanya terhadap gelombang primer. Gelombang sekunder dipisahkan menjadi dua bagian, yaitu bagian yang sefasa dengan gelombang primer disebut "in-phase" (komponen Real) dan bagian yang berbeda fasa sembilan puluh derajat disebut "out-of-phase" (komponen Imaginer).



Gambar 2.1 : Prinsip metode elektromagnetik.

## 2.2. TEORI DASAR ELEKTROMAGNETIK ( Telford, 1974 )

Untuk mempelajari penjalaran gelombang elektromagnetik dalam medium perlu diketahui persamaan-persamaan “Maxwell” tentang medan listrik dan medan magnet sebagai berikut :

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Dimana :

$J$  = Rapat arus ( $A/m^2$ )

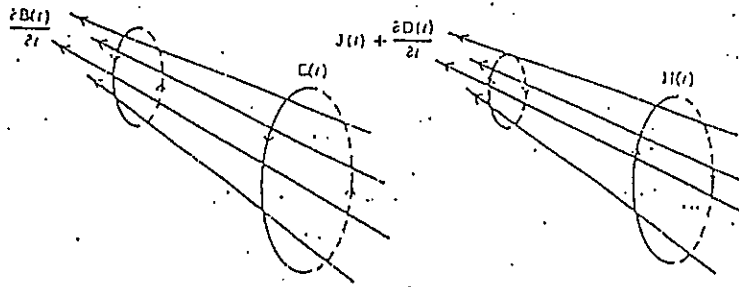
$E$  = Intensitas medan listrik ( $V/m$ )

$B$  = Rapat flux magnet ( $weber/m^2$ )

$H$  = Intensitas medan magnet ( $amp. turn/m$ )

$D$  = Arus pergeseran ( $C/m^2$ )

Persamaan (2.1) adalah pernyataan matematis dari “Hukum Faraday”, yaitu bahwa medan listrik timbul di dalam daerah yang ada perubahan medan magnet terhadap waktu, sedemikian hingga E medan listrik induksi adalah sebanding dengan harga negatif dari perubahan flux magnetik. Sedangkan persamaan (2.2) adalah pernyataan matematis dari “Hukum Ampere”.



Gambar 2.2 : Medan listrik dan medan magnet (After Grant dan West, 1965).

Dengan menggunakan identitas vektor  $\nabla \cdot \nabla \times \vec{A} = 0$ , dalam kedua persamaan tersebut, maka diperoleh :

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{E} = -\nabla \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{B}) = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{H} = \nabla \cdot \vec{J} + \nabla \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{D}) = 0$$

Diketahui juga bahwa divergensi dari arus adalah sama dengan jumlah akumulasi muatan persatuan waktu.

$$\nabla \cdot \bar{J} = -\frac{\partial q}{\partial t} = 0$$

Di dalam konduktor dengan harga daya hantar yang tertentu, tidak ada muatan yang tertimbun selama arus mengalir, maka ruas kanan pada persamaan di atas sama dengan nol, sehingga  $\nabla \cdot \bar{J}$  juga sama dengan nol, maka dari persamaan (2.3) diperoleh :

$$\nabla \cdot \bar{D} = \epsilon \epsilon_0 \nabla \cdot \bar{E} = 0 \quad (2.4)$$

Hubungan antara B dan H

$$\bar{B} = \mu \mu_0 \bar{H} \quad (2.5)$$

Dimana :

$\mu_0$  = Permeabilitas ruang hampa.

$\epsilon_0$  = Kapasitas untuk ruang hampa.

$\mu / \mu_0$  = Permeabilitas magnet relatif dari medium.

$\epsilon / \epsilon_0$  = Kapasitas dielektrikum relatif dari medium.

Untuk medium yang homogen isotrop berlaku "hukum Ohm".

$$\bar{B} = \mu \bar{H}, \bar{D} = \epsilon \bar{E} \text{ dan } \bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.1) dan (2.2) menjadi :

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \sigma \bar{E} + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2.8)$$

Bila persamaan (2.7) dan (2.8) menggunakan identitas vektor :

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \bar{A} &= \nabla (\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla \cdot \nabla \bar{A} \\ &= \nabla (\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \cdot \bar{A} \end{aligned}$$

maka diperoleh hasil :

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{E} &= \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \bar{H}) = \sigma \mu \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \bar{H} &= -\sigma (\nabla \times \bar{E}) - \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \bar{E}) \\ &= \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Penyelesaiannya adalah merupakan suatu fungsi harmonik (sinus).

$$\bar{E}(t) = \bar{E}_0 \cdot e^{j\omega t}, \quad \bar{H}(t) = \bar{H}_0 \cdot e^{j\omega t}$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = j\omega \bar{E} \quad , \quad \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = j\omega \bar{H} \quad (2.10)$$

Dimana  $\omega = 2\pi f =$  frekuensi angular medan.

Dari persamaan (2.9) dan (2.10) maka diperoleh :

$$\nabla^2 \bar{E} = j\omega \mu \sigma \bar{E} - \omega^2 \epsilon \mu \bar{E} \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = j\omega \mu \sigma \bar{H} - \omega^2 \epsilon \mu \bar{H} \quad (2.12)$$

Persamaan di atas adalah persamaan gelombang elektromagnetik yang merambat pada medium yang mempunyai daya hantar listrik  $\sigma$ , dan permeabilitas relatif dari medium  $\mu$  dan konstanta dielektikum  $\epsilon$

Apabila gelombang elektromagnetik merambat melalui medium, bukan ruang hampa, maka gelombang elektromagnetik akan mengalami attenuasi (teredam).

Persamaan gelombang elektromagnetik dalam konduktor:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{E} &= \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = j\omega \mu \sigma \bar{E} \\ \nabla^2 \bar{H} &= \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = j\omega \mu \sigma \bar{H} \end{aligned} \quad (2.13)$$

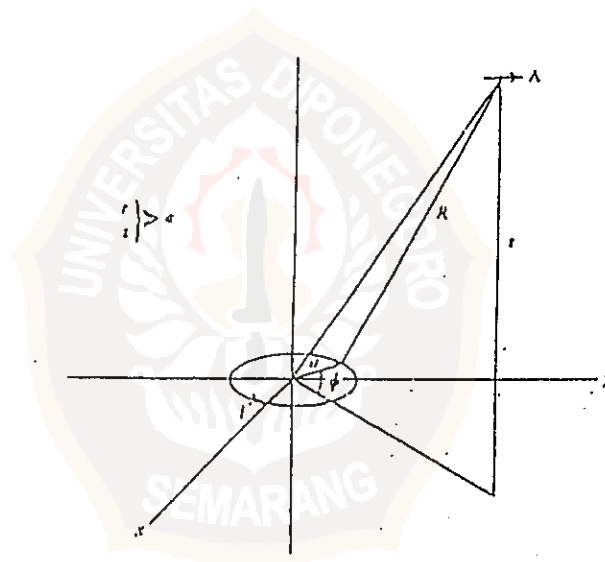


Persamaan gelombang elektromagnetik pada batuan biasa (bukan konduktor):

$$\nabla^2 \bar{E} = 0 \quad (2.14)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = 0 \quad (2.15)$$

### 2.3. MEDAN MAGNET PADA LOOP MELINGKAR (Grant dan West)



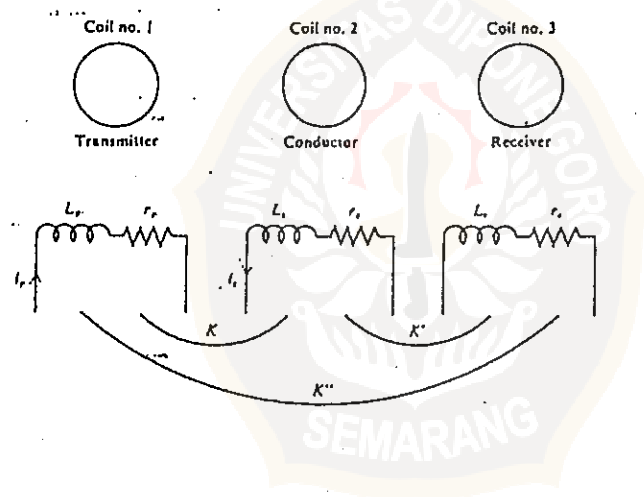
*Gambar 2.3 : Medan magnet pada loop melingkar*

Dengan menggunakan vektor potensial, maka didapatkan besarnya medan primer adalah:

$$\boxed{H_z^p = -\frac{i_p a^2}{4 l^3}} \quad (2.16)$$

## 2.4. METODE ELEKTROMAGNETIK HORIZONTAL LOOP (Telford 1974)

Metode elektromagnetik horizontal loop menggunakan tiga rangkaian listrik berbentuk coil, yaitu coil pertama adalah transmiter sebagai sumber medan primer, coil ke dua adalah konduktor sebagai sumber medan sekunder dan coil ke tiga adalah receiver sebagai penerima medan primer dan medan sekunder.



**Gambar 2.4 : Model rangkaian listrik pada metode EM. Horizontal loop.**

Tiga coil tersebut mempunyai induktansi dan resistansi, arus yang mengalir pada coil pertama adalah  $i_1$ , besarnya medan primer adalah :

$$H_p = K I_p \sin \omega t$$

Besarnya e.m.f adalah :

$$e_s = -M \frac{di_p}{dt} = -\frac{j\omega M H_p}{K}$$

M adalah mutual induktansi coil (1) dan coil (2), besarnya arus yang mengalir pada coil 2 adalah:

$$\begin{aligned} i_s &= e_s / z_s \\ &= e_s / (r_s + j\omega L_s) \end{aligned}$$

Dimana  $Z_s = (r_s + j\omega L_s)$  adalah efektif impedansi pada konduktor dengan resistansi  $r_s$  dan induktansi  $L_s$ .

Besarnya medan sekunder yang diterima oleh receiver adalah:

$$H_s = K' \cdot i_s$$

$$H_s = -\frac{M H_p}{L_s \beta} \quad (2.17)$$

$$1/\beta = \frac{Q^2 + jQ}{1 + Q^2}$$

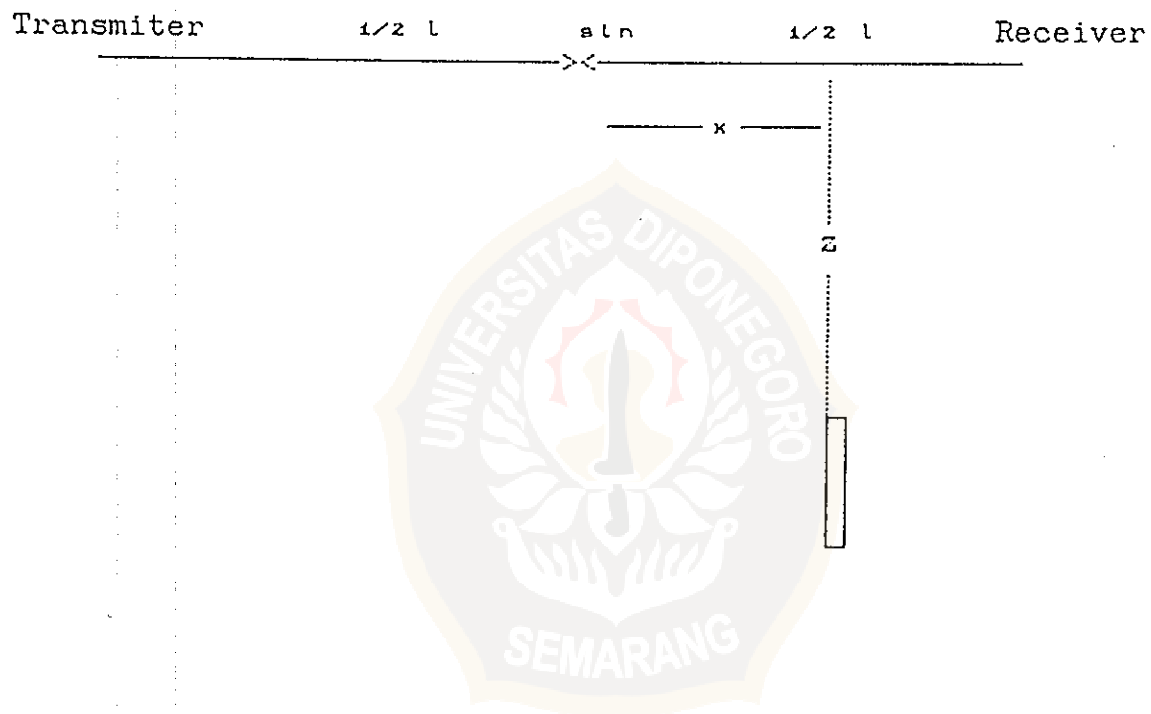
$K=K'$  adalah konstan dan  $Q = \omega L_s / r_s$ .

Besarnya medan primer yang diterima receiver :

$$H_p' = K'' i_p = K'' I_p \sin \omega t = K'' H_p / K$$

## 2.5. KOMPONEN SISTEM FASE HORIZONTAL LOOP (Telford 1974)

Dalam metode elektromagnetik horizontal loop, medan primer dan medan sekunder yang ditangkap oleh receiver dalam bentuk komponen Real dan komponen imajiner.



Gambar 2.5 : Sistem geometri pada horizontal loop

Besarnya komponen Re dan Im adalah:

$$\text{Re} = \frac{(4\alpha^2 - 1) \{Q^2 / (1 + Q^2)\}}{6.25(L/l) \left\{ (2z/l)^2 + (1 - 2\alpha)^2 \right\} \left\{ (2z/l)^2 + (1 + 2\alpha)^2 \right\}} \quad (2.18)$$

$$\text{Im} = \frac{(4\alpha^2 - 1) \{Q / (1 + Q^2)\}}{6.25(L/1) \left\{ (2z/1)^2 + (1 - 2\alpha)^2 \right\} \left\{ (2z/1)^2 + (1 + 2\alpha)^2 \right\}} \quad (2.19)$$

## 2.6 MODEL DISTRIBUSI ARUS DUA SUMBU (Grant dan West 1965)

Perumusan anomali gelombang elektromagnetik horisontal loop yang disebabkan oleh model lempeng tipis tegak yang tertanam dalam tanah untuk

komponen real dan komponen imajiner yaitu:

$$[\text{Re1}] = \frac{(4\alpha^2 - 1) \{Q^2 / (1 + Q^2)\}}{6.25(L/1) \left\{ (4z^2 / 1^2 + (1 - 2\alpha)^2) \right\} \left\{ 4z^2 / 1^2 + (1 + 2\alpha)^2 \right\}}$$

$$[\text{Re2}] = \frac{(4\alpha_1^2 - 1) \{Q^2 / (1 + Q^2)\}}{6.25(L/1) \left\{ (4z_2^2 / 1^2 + (1 - 2\alpha_1)^2) \right\} \left\{ 4z_2^2 / 1^2 + (1 + 2\alpha_1)^2 \right\}}$$

$$\boxed{[\text{R e}] = [\text{R e 1} - \text{R e 2}]} \quad (2.20)$$

Demikian juga untuk komponen imajiner.

$$[\text{Im1}] = \frac{(4\alpha^2 - 1) \{Q / (1 + Q^2)\}}{6.25(L/1) \left\{ 4z^2 / 1^2 + (1 - 2\alpha)^2 \right\} \left\{ 4z^2 / 1^2 + (1 + 2\alpha)^2 \right\}}$$

$$[\text{Im}2] = \frac{(4\alpha^2 - 1)\{Q/(1+Q^2)\}}{6.25(L/l)\{4z_2^2/l^2 + (1-2\alpha_1)^2\}\{4z_2^2/l^2 + (1+2\alpha_1)^2\}}$$

$$\boxed{[\text{Im}] = [\text{Im} 1 - \text{Im} 2]} \quad (2.21)$$

Dimana:

- Re1 = Respon komponen real bagian atas konduktor
- Re2 = Respon komponen real bagian bawah konduktor.
- Im1 = Respon komponen imajiner bagian atas konduktor.
- Im2 = Respon komponen imajiner bagian bawah konduktor.
- L = Induktansi konduktor.
- Res = Resistansi konduktor.
- f = Frekuensi konduktor.
- z = Kedalaman konduktor bagian atas.
- z<sub>2</sub> = Kedalaman konduktor bagian bawah.
- l = Jarak transmiter-receiver.
- pp = Panjang konduktor ke bawah.
- c = Jarak stn ke konduktor bagian atas.
- c<sub>2</sub> = Jarak stn ke konduktor bagian bawah.
- α = c/l
- α<sub>1</sub> = c<sub>2</sub> / l

$$Q = \omega L / R_{es}$$

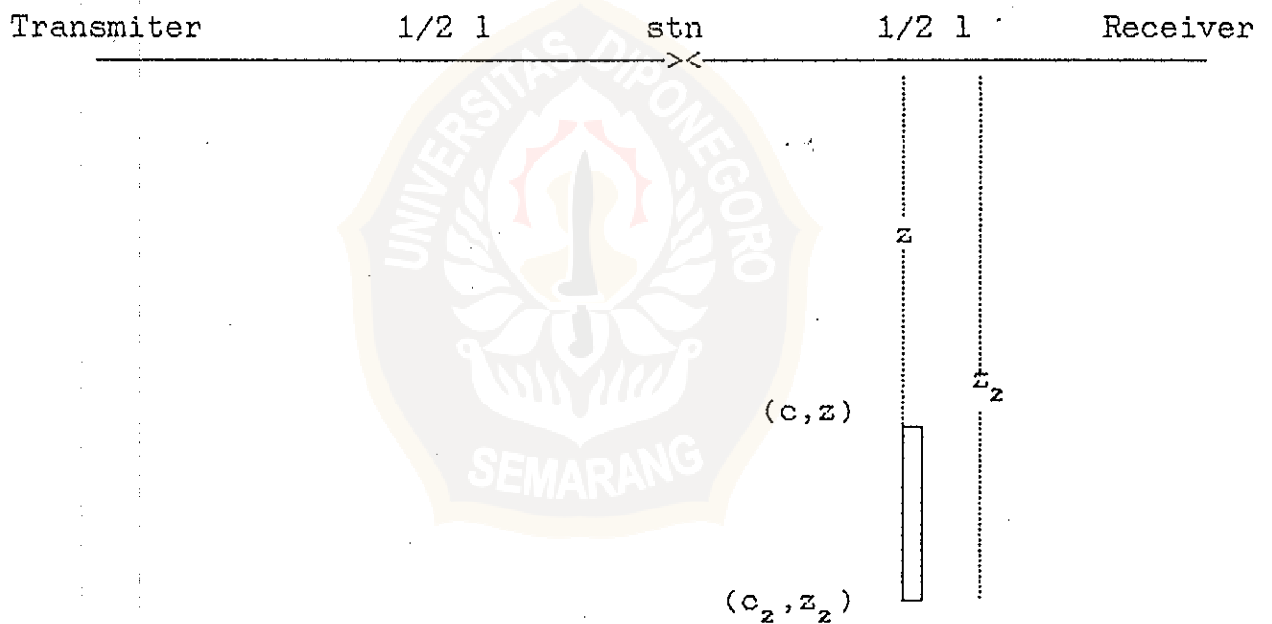
$$\omega = 2 \pi f$$

$$z_2 = z + pp (\sin((\pi/180) * kem))$$

$$c_2 = c + pp (\cos((\pi/180) * kem))$$

Re = Respon total untuk komponen Real

Im = Respon total untuk komponen Imaginer



Gambar 2.6: Geometri distribusi arus dua sumbu