

## Analisis dan Interpretasi Struktur Bawah Permukaan Dengan Metode Georadar

Alexander Pakiding  
alex\_pakiding@yahoo.com

Prodi Pendidikan Matematika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan,  
Universitas Kristen Indonesia Toraja

### ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang sifat fisis material bawah permukaan pada rencana pondasi Patung Garuda Wisnu Kencana Bali dengan Metode Georadar dan diketahui bahwa pada daerah eksplorasi seluas 4096 m<sup>2</sup> hingga kedalaman 30,72 m terdapat tiga lapisan material:

Lapisan	$V \times 10^9$ (m/s)	$\epsilon$ (permitivitas)	Jenis Material
I	0.0446	45.2113	Campuran antara tanah, kerakal dan bongkah
II	0.0732 – 0.0838	16.7967 – 12.8161	Batu gamping pasiran
III	0.1070	7.8683	Batu gamping kristalin

Lapisan pertama mempunyai kemiringan relatif rata, terdapat pada kedalaman 0.0 m hingga 5.60 m atau 7.35 m, dicirikan dengan citra radar hitam pekat yang diselingi garis putih relatif lurus. Lapisan II mempunyai kemiringan kearah barat, berada pada kedalaman antara 5.60 m atau 7.35 m hingga 26.41 m dengan ketebalan antara 0.0 m hingga 20.81 m, dicirikan oleh citra radar dengan warna hitam yang diselingi garis-garis putih yang tidak teratur. Lapisan III berada pada kedalaman antara 6.30 m hingga 30.72 m dengan perlapisan searah lapisan II, dicirikan oleh citra radar dengan warna noda-noda hitam yang tersebar merata.

**Kata kunci :** Georadar, kecepatan, permitivitas.

## PENDAHULUAN

### 1. Latar Belakang

Tanggapan material terhadap gangguan yang diberikan sangat bergantung pada sifat fisis material tersebut. Karena material mempunyai sifat fisis yang berbeda-beda, maka tanggapannya terhadap gangguanpun berbeda-beda. Oleh karena itu tanggapan material terhadap gangguan dapat digunakan untuk menafsirkan material itu sendiri.

Berdasarkan sifat fisis dan tanggapan terhadap gangguan, Geophysical Survey

System Inc. telah mengembangkan suatu metode eksplorasi bawah permukaan yang cukup dangkan dengan menggunakan gelombang elektromagnetik yang disebut metode Georadar atau Electromagnetic Subsurface Profiling (ESP).

Gelombang elektromagnetik yang digunakan pada metode georadar dipancarkan ke dalam tanah melalui antenna pemancar (*transmitter*) dan pantulannya terekam oleh penerima (*receiver*). Proses pemancaran hingga penerimaan gelombang berlangsung dalam waktu yang sangat singkat sehingga

satuan waktu yang digunakan dinyatakan dalam nanosecond ( $10^{-9}$  s).

Prinsip metode georadar analog dengan metode seismik refleksi, tetapi seismik refleksi memanfaatkan gelombang akustik sedang georadar memanfaatkan gelombang elektro-magnetik yang penetrasinya relatif lebih dangkal.

Karena pengambilan data pada metode georadar dilakukan sepanjang lintasan, maka akan diperoleh gambaran bawah permukaan yang kontinu sehingga model perlapisan secara langsung dapat pula diperoleh.

Gelombang yang digunakan dalam metode ini diperoleh dari gelombang radio modulasi frekuensi (FM).

Kedalaman penetrasi radar bergantung pada konduktivitas dan konstanta dielektrik. Jika konduktivitas rendah maka penetrasi radar akan dalam dan sebaliknya.

Metode georadar telah digunakan pada bidang-bidang geoteknik, rekayasa, lingkungan dan arkeologi.

## 2. Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah pemanfaatan georadar untuk:

1. Menghitung kecepatan penjalaran gelombang elektromagnetik dalam lapisan bumi.
2. Menghitung konstanta dielektrik lapisan.
3. Analisis struktur bawah permukaan bumi lapisan dangkal.
4. Menggambarkan profil anomaly lapisan dangkal secara umum.

## 3. Ruang lingkup penelitian

Dalam penelitian ini yang dilakukan adalah menafsirkan data analog hasil rekaman georadar yang merupakan tanggapan material terhadap gangguan gelombang elektromagnetik yang diberikan khusus untuk lapisan dangkal.

## TINJAUAN PUSTAKA

### 1. Teori Dasar Gelombang Elektromagnetik.

Perilaku gelombang elektromagnetik telah dikaji dan dirumuskan secara matematis oleh Maxwell. Perumusan ini menjadi dasar dari segala fenomena elektromagnetik.

Persamaan Maxwell dimana dibolehkan adanya muatan dan arus konduksi dalam suatu daerah secara umum dituliskan dalam bentuk (Murjono, 1993):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu\alpha\vec{E} + \mu\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

dengan :

$\vec{E}$ = medan listrik (volt/m)

$\vec{B}$ = medan magnet (Weber / m<sup>2</sup>)

$\rho$ = resistivitas (Ohm meter)

$\mu$ = permeabilitas (Hendri/m)

$\epsilon$  = permitivitas (Farad / m)

$\sigma$ =Konduktivitas (Seimen/m=(Ohm/m)

Untuk arus bebas, persamaan kontinuitasnya adalah

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (5)$$

dengan

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (6)$$

Sesuai dengan hukum Ohm dan hukum Gauss, maka diperoleh persamaan :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\sigma}{\epsilon} \rho \quad (7)$$

Dengan intensitas vector, maka jika persamaan (3) dan (4) dilakukan operasi vektor difrensial kemudian mensubtitusi persamaan (3) dan (4) kedalam persamaan masing-masing ke persamaan tersebut, maka diperoleh persamaan gelombang untuk E dan B sebagai berikut:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla^2 \bar{B} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (9)$$

Suku pertama dan kedua pada ruas kanan persamaan di atas masing-masing adalah persamaan penjalaran dan persamaan difusinya.

Solusi dari kedua persamaan tersebut masing-masing adalah :

$$\bar{E}^*(x, t) = \bar{E}_0^* e^{i(kx - \omega t)} \quad (10)$$

$$\bar{B}^*(x, t) = \bar{B}_0^* e^{i(kx - \omega t)} \quad (11)$$

dengan ;

$$k = k_- + ik_+ \text{ (kompleks)} \quad (12)$$

$$k_{\pm} = \omega \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2} \left[ \sqrt{1 + \left[ \frac{\sigma}{\epsilon\omega} \right]^2} \pm 1 \right]}^{1/2} \quad (13)$$

Untuk konduktor yang baik ( $\sigma \gg \epsilon\omega$ ),  $k_-$  dan  $k_+$  nilainya hampir sama :

$$k_+ \cong k_- \cong \sqrt{\frac{\omega\sigma\mu}{2}} \quad (14)$$

dengan :

$K$  = konstanta perambatan (m-1)

$k_-$  = konstanta pergeseran fasa (m-1)

$k_+$  = factor atenuasi (m-1)

$\omega = 2\pi f$ :  $f$  = frekuensi (Hz)

Jarak yang digunakan untuk mereduksi amplitude gelombang sehingga tinggal 1/e dari amplitude masukan disebut kedalaman kulit (skin dept).

$$\delta = \left[ \frac{1}{k_-} \right] = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (15)$$

Dengan:  $\delta$  = kedalaman kulit (m)

Kedalaman kulit merupakan ukuran kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik ke dalam konduktor.

Jika medium homogeny dan linier, dari persamaan Maxwell dan dengan menggunakan persamaan gelombang klasik:

$$\bar{\nabla}^2 f = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (16)$$

Maka diperoleh kecepatan penjalaran gelombang elektromagnetik dalam ruang vakum

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (17)$$

Dan kecepatan perambatan dalam medium

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (18)$$

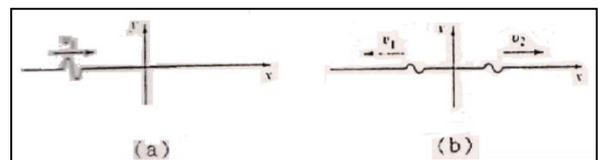
## 2. Syarat Batas Gelombang Refleksi dan Transmisi

Dari solusi persamaan gelombang elektromagnetik pada persamaan (10) dan (11); jika gelombang ini tiba pada suatu bidang batas akan mengalami pemantulan dan transmisi (Gambar 1) . pada gambar tersebut berlaku persamaan gelombang sebagai berikut :

$$\bar{E}^*(x, t) = \begin{cases} \bar{E}_0^* e^{i(k_1x - \omega t)} + \bar{E}_0^* e^{i(-k_1x - \omega t)} & , x < 0 \\ \bar{E}_0^* e^{i(k_2x - \omega t)} & , x > 0 \end{cases}$$

(19)

$$\bar{B}^*(x, t) = \begin{cases} \bar{B}_0^* e^{i(k_1x - \omega t)} + \bar{B}_0^* e^{i(-k_1x - \omega t)} & , x < 0 \\ \bar{B}_0^* e^{i(k_2x - \omega t)} & , x > 0 \end{cases} \quad (20)$$



Gambar 1. Sifat gelombang pada bidang batas

(a) Gelombang datang

(b) Gelombang pantul dan transmisi

Pada  $x = 0$  (bidang batas akan terjadi pantulan dan transmisi gelombang dengan anggapan bahwa di daerah tersebut berlaku hukum kekekalan, sehingga :

$$\bar{E}_i + \bar{E}_r = \bar{E}_t \quad (21)$$

$$\bar{B}_i + \bar{B}_r = \bar{B}_t \quad (22)$$

Besarnya amplitude yang terpantulkan akan sama dengan besarnya amplitude yang berkurang pada gelombang yang ditransmisikan. Secara matematis hal ini dituliskan sebagai berikut;

$$f^*(0^-, t) = f^*(0^+, t) \quad (23)$$

dengan  $f^*$  sebagai fungsi  $\bar{B}$  dan  $\bar{E}$

Turunan dari fungsi ini adalah :

$$\left. \frac{\partial f^*}{\partial x} \right|_{0^-} = \left. \frac{\partial f^*}{\partial x} \right|_{0^+} \quad (24)$$

Jika syarat batas ini diterapkan terhadap persamaan (19) dan (20), maka persamaan (21) dan (22) menjadi:

$$k_1(\bar{E}_i^* - \bar{E}_r^*) = k_2 \bar{E}_t^* \quad (21')$$

$$k_1(\bar{B}_i^* - \bar{B}_r^*) = k_2 \bar{B}_t^* \quad (22')$$

Jika  $\mu_2 < \mu_1$  sehingga  $V_1 > V_2$  ketiga gelombang mempunyai sudut fasa yang sama sehingga dari persamaan (21), (22), (21') dan (22') maka amplitude gelombang pantul dan transmisi adalah :

$$\bar{E}_r = \left[ \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \right] \bar{E}_i,$$

$$\bar{B}_r = \left[ \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \right] \bar{B}_i \quad (25)$$

$$\bar{E}_t = \left[ \frac{2V_2}{V_2 + V_1} \right] \bar{E}_i,$$

$$\bar{B}_t = \left[ \frac{2V_2}{V_2 + V_1} \right] \bar{B}_i \quad (26)$$

Jika  $\mu_1 < \mu_2$  sehingga  $V_2 < V_1$  maka :

$$\begin{aligned} \bar{E}_r &= \left[ \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \right] \bar{E}_i, \\ \bar{B}_r &= \left[ \frac{2V_2}{V_2 + V_1} \right] \bar{B}_i \end{aligned} \quad (27)$$

Sedangkan amplitudo transmisinya persamaan (26) tidak berubah. Pada keadaan

husus dimana medium kedua sangat massif maka akan terjadi pemantulan total.

$$\bar{E}_r = \bar{E}_i, \quad \bar{B}_r = \bar{B}_i \quad (25')$$

$$\bar{E}_t = \bar{B}_t \quad (26')$$

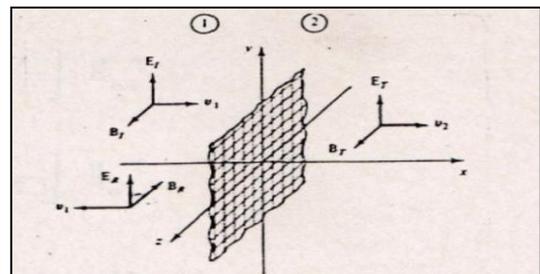
### 3. Gelombang Datang Tegak Lurus Bidang Datar

Misalkan bidang xy adalah batas antara dua medium linier. Jika gelombang bidang bergerak dari arah x negatif dengan frekuensi (ve dengan frekuensi ( $\omega$ ) dan terpolarisasi ke arah y, maka :

$$\begin{aligned} \bar{E}_i^*(x, t) &= \bar{E}_{0i}^* e^{i(k_1x - \omega t)} \hat{j} \\ \bar{B}_i^*(x, t) &= \frac{1}{V_1} \bar{E}_{0i}^* e^{i(k_1x - \omega t)} \hat{k} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_r^*(x, t) &= \bar{E}_{0r}^* e^{i(-k_1x - \omega t)} \hat{j} \\ \bar{B}_r^*(x, t) &= -\frac{1}{V_1} \bar{B}_{0r}^* e^{i(-k_1x - \omega t)} \hat{k} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_t^*(x, t) &= \bar{E}_{0t}^* e^{i(k_2x - \omega t)} \hat{j} \\ \bar{B}_t^*(x, t) &= \bar{B}_{0t}^* e^{i(k_2x - \omega t)} \hat{k} \end{aligned} \quad (29)$$



Gambar 2. Gelombang datang tegak lurus bidang batas

dengan :

$\vec{E}^*$  = medan listrik kompleks

$\vec{B}^*$  = medan magnet kompleks

Indeks :

i = incident (masuk)

r = refleksi

t = transmisi

pada  $x = 0$  sesuai dengan persamaan (13) diperoleh

$$\vec{E}_{ot}^* = \vec{E}_{or}^* = \vec{E}_{ot}^* \quad (30)$$

sehingga didapatkan

$$\frac{1}{\mu_1 V_1} [\vec{E}_{oi}^* - \vec{E}_{or}^*] - \frac{1}{\mu_2} \frac{k_2}{\omega} \vec{E}_{ot}^* = 0 \quad (31)$$

atau

$$\vec{E}_{oi}^* - \vec{E}_{or}^* = \beta \vec{E}_{ot}^* \quad (32)$$

dengan ;

$$\beta = \frac{\mu_1 V_1 k_2}{\mu_2 \omega} \quad (33)$$

Sesuai dengan persamaan (30) dan (32), maka :

$$\vec{E}_{or}^* = \left[ \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right] \vec{E}_{oi}^* \quad (34)$$

$$\vec{E}_{ot}^* = \left[ \frac{2}{1 + \beta} \right] \vec{E}_{oi}^* \quad (35)$$

Untuk konduktor yang baik ( $\sigma \gg \mu_2 \omega$ ),  $|\beta|$  sangat besar sehingga :

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right] &\cong - \left[ 1 - \frac{1}{\beta} \right] \\ &\cong \frac{2}{\beta} - 1 \end{aligned} \quad (36)$$

Dengan pendekatan ini, maka koefisien refleksi menjadi

$$\begin{aligned} R &= \frac{|\vec{E}_{or}^*|}{|\vec{E}_{oi}^*|} \\ &\cong 1 - 2 \frac{(\beta + \beta^*)}{|\beta|^2} \end{aligned} \quad (37)$$

Atau dengan menggunakan persamaan (33), (12) dan (14), maka :

$$R = 1 - \sqrt{8 \left[ \frac{\mu_2}{\mu_1} \right] \left[ \frac{\omega \epsilon_1}{\sigma} \right]} \quad (38)$$

## 2. Georadar

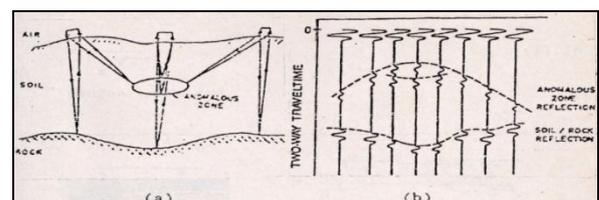
Georadar yang pertama kali diperkenalkan oleh Cook pada tahun 1960, telah mengalami perkembangan yang cukup pesat dan pemakaiannya cukup luas. Luasnya pemakaian georadar disebabkan karena hasil deteksinya sangat memberrikan informasi yang akurat pada kedalaman dangkal. Selain itu georadar dapat dioperasikan dengan mudah dan cepat,

### 2.1 Metode georadar

Pada dasarnya metode georadar mempunyai prinsip yang sama dengan seismik refleksi, hanya saja pada seismik refleksi digunakan gelombang akustik dan penetrasinya cukup dalam sedangkan pada metode georadar digunakan gelombang elektromagnetik yang penetrasinya relative dangkal.

Gelombang elektromagnetik yang digunakan pada metode georadar diperoleh dari gelombang rado Modulasi Frekuensi (FM) yang dipancarkan melalui antenna pemancar (transmitter). Pulsa gelombang akan merambat kedalam tanah dank arena adanya konduktivitas material bawah permukaan yang merupakan reflector, maka sebagian dari pulsa gelombang ini akan dipantulkan. Pantulan pulsa gelombang ini akan dideteksi oleh antenna penerima ( receiver) dan selanjutnya dicetak di recording paper.

Gambar (3a) berikut adalah cara penjalaran gelombang yang datang pada suatu anomaly yang berfungsi sebagai reflector dan Gambar (3b) adalah sketsa rekaman georadar dari pengukuran pada Gambar (3a).



Gambar 3. Penjalaran gelombang dan sketsa rekamannya,

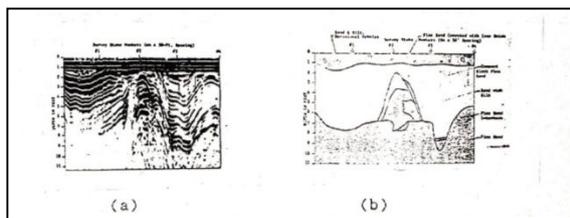
Besa kecilnya amplitude gelombang yang dipantulkan oleh reflector dapat dilihat pada hasil rekaman georadar. Rekaman(4.a). Remakan ini ditampilkan dalam bentuk kontras warna. Warna hitam menunjukkan amplitude gelombang pantul dari reflector besar dan warna putih jika amplitude gelombang yang dipantulkan kecil atau sama dengan nol. Sedangkan warnna antara hitam dan putih menunjukkan amplitudo sedang.

Kontras warna rekaman georadar ini juga sekaligus memperlihatkan besar kecilnya nilai konduktivitas material bawah permukaan yang terdeteksi.

Jika konduktivitas material kecil maka amplitude gelombang yang direfleksikan besar dan rekaman pada georadar akan tampil dengan warna hitam dan sebaliknya warna putih untuk konduktivitas material tinggi. Dengan mensubtitusi persamaan (15) ke persamaan (18), diperoleh :

$$V = \frac{1}{\sqrt{K\sigma}} \quad (18')$$

dengan :  $K = \epsilon\omega\delta$



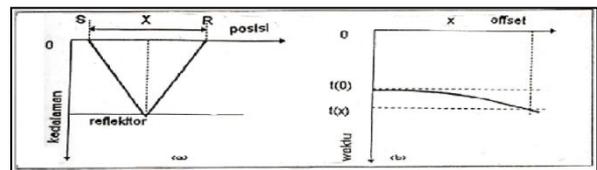
Gambar 4. Rekaman asli georadar dan hasil interpretasinya Geophysical survey System. Inc. 1976.

## 2.2 Interpretasi Data Georadar

Untuk menginterpretasi rekaman georadar diperlukan data kecepatan penjalaran gelombang dalam lapisan bumi atau data geologis pada daerah penelitian.

Untuk mendapatkan data kecepatan dapat dilakukan dengan menggunakan data pengukuran di lapangan atau dengan menganalisis lapisan material / bumi di laboratorium.

Data lapangan yang digunakan untuk mendapatkan kecepatan diperoleh dari hasil pengukuran dengan menggunakan dua transduser yang masing-masing berfungsi sebagai pengirim gelombang (transmitter) dan penerima gelombang (receiver). Dari rekaman ini didapatkan data jarak antara kedua transduser dan waktu penjalaran gelombang dari pemancar ke reflector hingga penerima.



Gambar 5. Koreksi offset

Elisabeth fisher\*, George A. Mc. Mechan dkk, 1992

Keterangan :

S = posisi transmitter

R = posisi receiver

t(0) = waktu pada jarak x = 0

t(x) = waktu setelah jarak x

0 = posisi awal.

Pulsa gelombang yang dipancarkan di (s) oleh penerima di (R). Karena posisi (S) tetap sedangkan (R) bergerak ke kanan, matka makin bertambah (x), waktu yang digunakan pulsa untuk sampai di (R) semakin besar, tetapi hasil rekamannya tidak linier. Dari pengoperasian ini didapatkan rekaman seperti pada gambar 5b.

Waktu penjalaran gelombang dari transmitter pada posisi S ke reflector hingga pada R (Fisher E., 1992) adalah :

$$t^2 = \frac{(x^2 + 4Z^2)}{V^2} \quad (39)$$

dengan : x = jarak antenna (m)

Z = kedalaman (m)

V = kecepatan penjalaran (m/s).

Pada x = 0 (transmitter berimpit dengan receiver), maka :

$$t^2 = \frac{4Z^2}{V^2} \quad (40)$$

dengan :

$t(0)$  = waktu bolak balik (twt)

$t(x)$  = twt pada jarak  $x$

$V$  = kecepatan penjalaran gelombang (m/s)

Maka persamaan (42) dapat ditulis menjadi :

$$t^2 = t^2(0) + \frac{x^2}{V^2} \quad (39')$$

Untuk lapisan miring :

$$t^2 = \frac{x^2}{V^2} + \frac{4h^2}{V^2} + \frac{4hx \sin \alpha}{V^2} \quad (39^*)$$

Atau

$$t^2 = \frac{x^2}{V^2} + \frac{4h'}{V^2} \quad (39^* *)$$

dengan ;  $h' = h + \frac{x}{2} \sin \alpha$

Jika penampang dari data georadar terdiri dari  $n$ -lapis horizontal dengan waktu tempuh vertical masing-masing  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  dan kecepatan pada lapisan masing-masing  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ , maka  $V_{rms}$  dapat ditentukan dari hubungan:

$$V_{rms} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n V_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \right] \quad (41)$$

Dengan  $V_{rms}$  = waktu penjalaran gelombang efektif (m/s) untuk satu lapisan, kecepatan dapat diperoleh dengan menggunakan grafik, yaitu antara  $t^2$  terhadap  $x^2$ . Kemiringan dari grafik ini adalah  $\frac{1}{V^2}$ , maka ;

$$V = \sqrt{\text{arc tan } \theta} \quad (42)$$

dengan ;  $\theta$  = sudut emiringan grafik  $t^2$  Vs  $x^2$ .

Dari pengujian material di labortorium, yaitu dengan menggunakan Jalur Transmisi Sesumbu akan diperoleh konstanta dielektri dari material. Dengan demikian perambatan gelombang elektromagnetik dapat dihitung (Davis dan Anna, 1989).

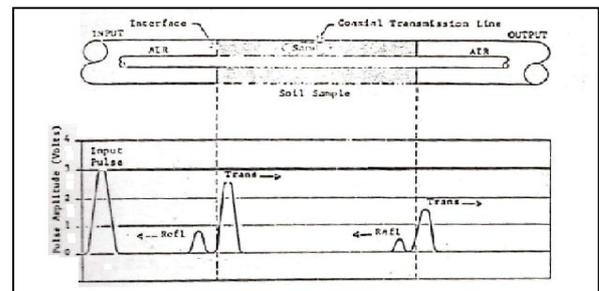
Dengan memasukkan sampel sepanjang  $L$  ke dalam Jalur Transmisi Sesumbu kemudian kepadanya dijalarkan gelombang elektromagnetik (Gambar 6). Dari pengukuran diperoleh data waktu penjalaran gelombang ( $t$ ) dengan panjang sampel ( $L$ ). Dengan data tersebut maka konstanta dielektrik dapat dihitung dengan rumus (Geophysical survey System Inc., 1971) :

$$\epsilon_i = \left[ \frac{ct_i}{2L} \right]^2 \quad (43)$$

dengan :  $c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s)

$t$  = Waktu penjalaran (s)

$L$  = panjang sampel (m).



Gambar 8. Coaxial Transmission Line Geophysical Survey System. Inc., 1972

Dengan mengetahui nilai konstanta dielektrik material, maka kecepatan penjalaran gelombang elektromagnetik dalam material tersebut dapat dihitung (C.J. Vaughan, 1990).

$$V_i = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_i}} \quad (44)$$

Konstanta dielektrik dan kecepatan perambatan gelombang elektromagnetik pada beberapa material diperlihatkan dalam Tabel 1.

Material	Konstanta Dielektrik	Kecepatan perambatan gelombang elektromagnetik (m/ns)
Pasir kering/ kerikil	3 – 5	0.15
Pasir basah/kerikil	5 – 16	0.14 – 0.07
Tanah liat kering/ sedimen	3 – 5	0.15 –
Tanah liat basah / sedimen	5 – 40	0.14 – 0.05
Air tawar	81	0.03
Granit	4 – 9	0.15 – 0.10
Udara	1	0.30

Tabel 1. Konstanta dielektrik dan kecepatan perambatan gelombang elektromagnetik pada beberapa material C. J. Vaughan.

### 3. Analisis Kedalaman

Kedalaman penetrasi radar juga sangat bergantung pada nilai konstanta dielektrik dan konduktivitas material bawah permukaan. Jika konduktivitas material besar maka penetrasi radar akan dangkal dan sebaliknya. Kedalaman penetrasi radar dapat ditentukan dengan menggunakan hubungan sebagai berikut (Fisher E., 1992).

$$D = V_{rms} \left[ \frac{t}{2} \right] \quad (45)$$

dengan : D = kedalaman (m).

### METODOLOGI

Dalam menganalisis dan menginterpretasi struktur bawah permukaan dengan metode georadar dalam penelitian ini, ditempuh langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengukur besarnya nilai kalibrasi waktu penjalaran gelombang.
2. Menghitung kecepatan penjalaran gelombang dalam material dengan menggunakan kemiringan grafik antara  $t^2$  Vs  $X^2$ ,  
 yaitu :  $V = \sqrt{\frac{1}{m}}$  ;  $m = \frac{t^2}{X^2}$   
 dengan :  
 m = kemiringan grafik  
 V = kecepatan penjalaran gelombang EM dalam material
3. Menghitung konstanta dielektrik lapisan material/bumi yang terdeteksi dengan menggunakan persamaan (44).
4. Menghitung kedalaman deteksi radar dan ketebalan lapisan material/bumi dengan menggunakan persamaan (45).
5. Menggambarkan profil bidang batas yang diperoleh dari sayatan pada kontur bidang batas lapisan.

Jenis material yang terdeteksi oleh radar diketahui dari hasil pengeboran pada beberapa titik.

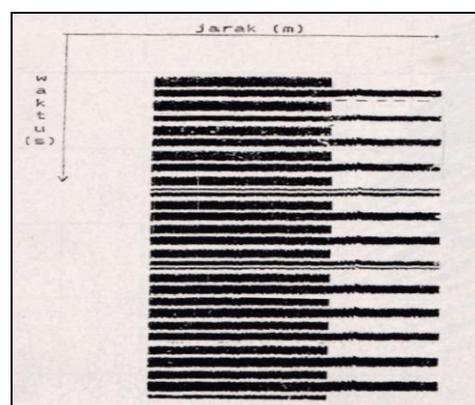
### PEMBAHASAN

Dari pengukuran dengan metode georadar diperoleh tiga macam rekaman. Ketiga rekaman ini mempunyai keterkaitan didalam menganalisis dan menginterpretasi struktur bawah permukaan yang dideteksi. Ketiga rekaman tersebut adalah rekaman kalibrasi waktu, rekaman kecepatan penjalaran gelombang dan rekaman utama georadar.

#### 1. Kalibrasi Waktu

Pengukuran kalibrasi waktu digunakan sebagai standar untuk menentukan waktu penjalaran gelombang dalam lapisan material bumi yang kemudian untuk perhitungan kecepatan penjalaran dan kedalaman /ketebalan lapisan.

Rekaman kalibrasi waktu pada metode ini ditampilkan dalam bentuk garis hitam tebal yang berselang seling panjang dan pendek. Jarak dari batas atas garis hitam tebal pendek ke batas atas garis hitam tebal panjang mewakili waktu 10 nanosecon ( $1 \times 10^{-9}$  s). Nilai ini sama dengan waktu penjalaran dari setengah panjang gelombang yang digunakan sehingga diketahui bahwa frekuensi gelombang yang digunakan dalam penelitian ini adalah 50 MHz.



Gambar (7) Rekaman kalibrasi waktu

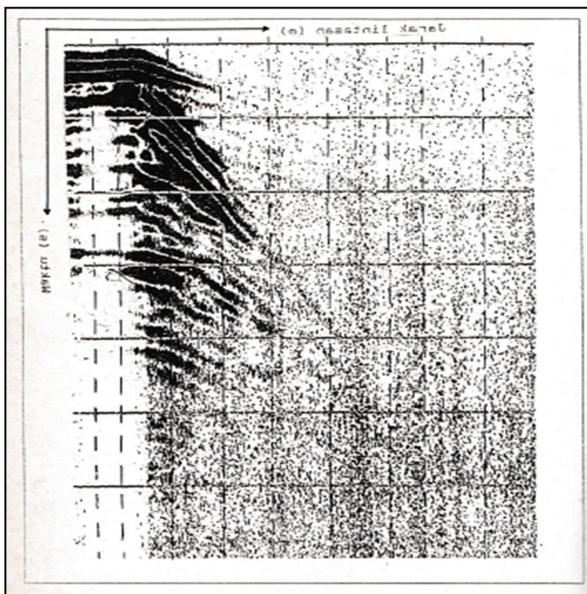
Setelah jarak dari batas atas garis hitam pendek ke batas garis hitam panjang pada rekaman kalibrasi waktu diukur secara keseluruhan dan mengambil rata-ratanya, perbandingan antara waktu penjalaran gelombang dengan jarak adalah  $10 \text{ ns} \cong 3.55 \text{ ns}$

## 2. Perhitungan Kecepatan Penjalaran Gelombang

Dari rekaman kecepatan penjalaran gelombang elektromagnetik dalam lapisan material bumi pada daerah penelitian diperoleh data jarak lintasan dan waktu penjalaran gelombang elektromagnetik (Gambar 8).

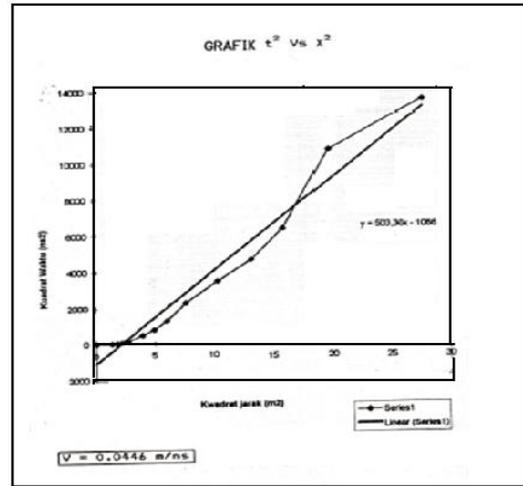
Waktu penjalaran gelombang elektromagnetik diperoleh dengan mengkonversi jarak vertical pada rekaman penjalaran gelombang ke waktu dalam satuan nanosecond dengan bantuan data kalibrasi waktu. Jarak antara garis putus-putus yang memotong rekaman kecepatan penjalaran gelombang memiliki jarak dua meter (2 m).

Kecepatan penjalaran gelombang dalam lapisan material pada daerah penelitian (Tabel 2 kolom 2), diperoleh dengan menggunakan kemiringan grafik (m) dengan  $= \sqrt{\frac{1}{m}}$ .



Gambar (8) Rekaman kalibrasi waktu

Pembuatan grafik dalam pembahasan ini dilakukan dengan menggunakan program paket Exell, dimana m juga juga dapat ditampilkan (Gambar 9).



Gambar (9) Grafik  $t^2 \text{ vs } x^2$

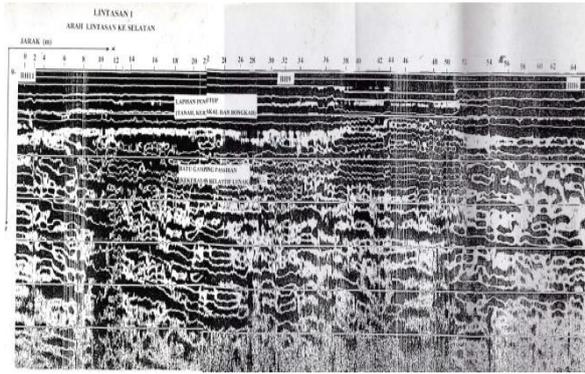
Dengan menggunakan persamaan (47) konstanta dielektrik dari material inipun dapat ditentukan (Tabel 1 Kolom 3). Jenis material yang terdeteksi (Tabel 2 kolom 4) diketahui dari data pengeboran dan juga dapat diamati langsung pada lokasi penelitian. Kedalaman deteksi radar pada daerah penelitian adalah 30,73 m.

Lapisan	$V \times 10^{-9}$ (m/s)	$\epsilon$	Jenis Material
I	0.0445	45.2113	Campuran antara tanah, kerakal dan bongkah.
II	0.0732- 0.0838	16.7967- 128161	Batuan gamping pasiran.
III	0.1070	7.8683	Batu gamping kristalin.

Tabel (2): Kecepatan Penjalaran Gelombang, Konstanta Dielektrik dan Jenis material pada daerah penelitian.

## 3. Rekaman Utama Georadar

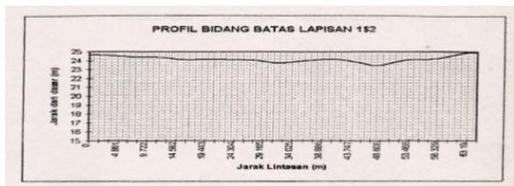
Rekaman utama georadar memberikan gambaran struktur bawah permukaan sepanjang lintasan.



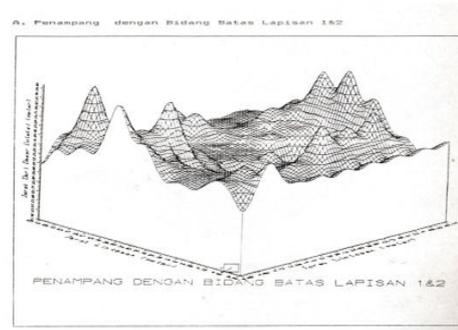
Gambar (10) Rekaman utama georadar

Pada rekaman ini Nampak batas-batas lapisan material yang dengan mempertimbangkan data kecepatan penjalaan gelombang dan konstanta dielektik maka secara umum pada daerah penelitian seluas 4096 m<sup>2</sup> hingga kedalaman 30.73 m dikelompokkan dalam tiga lapisan material, yaitu :

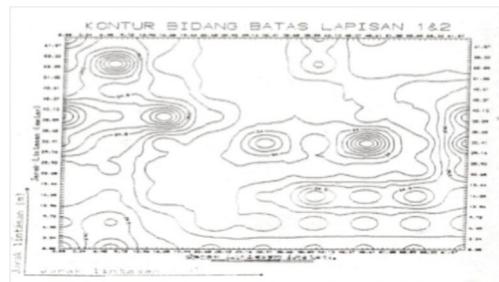
1. Lapisan pertama yaitu campuran antara tanah, kerakal dan bongkah hasil pecahan batu gamping, mempunyai perlapisan relative rata (Lampiran 1A) dengan ketebalan antara 5.62 m hingga 7.35 m. pada rekaman utama lapisan in dicirikan oleh citra radar dengan warna hitam pekat yang diselingi garis putih yang relative lurus. Kondisi ini mencerminkan bahwa tanah permukaan pada saat dilakukan penelitian secara umum mempunyai sifat konduktivitas listrik yang cukup tinggi.



Gambar (11). Profil Kedalaman Lapisan I dan II

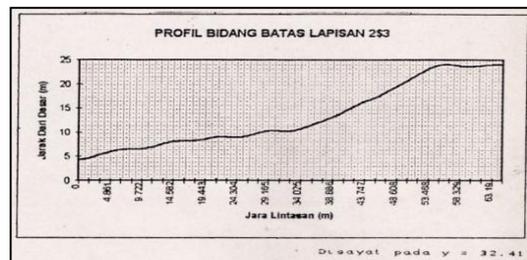


Gambar (12) Penampang Bidang Batas I dan II

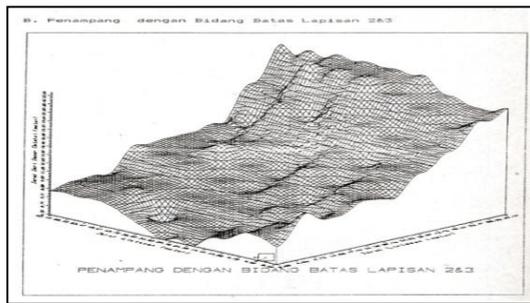


Gambar (13) Kontur Bidang Batas Lapisan II dan III

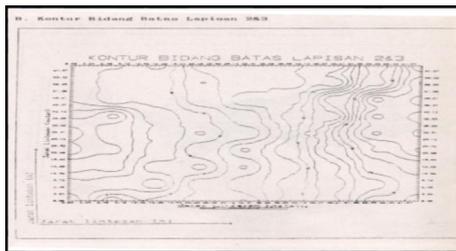
2. Lapisan kedua adalah batu gamping pasiran dengan kekerasan relative lunak, dicirikan oleh citra hitam yang diselingi garis-garis putih bergelombang dan tidak teratur, mempunyai kemiringan kea rah barat. Hal ini jelas terlihat pada rekaman, dimana pada lintasan 1 sampai 9 lapisan ini tampak datar sedang pada lintasan 10 ampai 18 nampak miring dengan ketebalan berkisar antara 0.0 m hingga 20.81 m berada pada antara 5.65 m dan 7.35 m hingga 20.81 m.



Gambar (14). Profil Kedalaman Lapisan II dan III



Gambar (15) Penampang Bidang Batas II dan III



Gambar (16) Kontur Bidang Batas Lapisan I dan II

3. Lapisan ketiga adalah batu gamping kristalin dengan kekerasan relative keras, ada rekaman utama dicirikan oleh nodanoda hitam yang tersebar merata. Ketebalan lapisan belum dapat ditentukan karena bidang batas dengan laoisan di bawahnya belum nampak.

## SIMPULAN DAN SARAN

### Simpulan

Dari hasil penelitian dengan menggunakan metode georadar pada daerah rencana pondasi Patung Garuda Wisnu Bali, diketahui bahwa pada daerah seluas 4096 m<sup>2</sup> hingga kedalam 30,72 m terdapat tiga jenis lapisan material, dengan:

1. Kecepatan gelombang pada masing-masing lapisan adalah :
 
$$v_1 = 4.46 \times 10^7 m/s$$

$$v_2 = (7.32 - 8.38) \times 10^7 m/s$$

$$v_3 = 1.070 \times 10^9 m/s$$
2. Konstanta dielektrik masing-masing lapisan adalah :  $\epsilon_1 = 45.2112, \epsilon_2 =$

(16.7967 - 12.8161),  $\epsilon_3 = 7.8683$ , Jenis material masing -masing lapisan adalah sebagai berikut :

- Lapisan pertama terdiri dari campuran antara tanah, kerakal dan bongkah hasil pecahan batu gamping.
  - Lapisan kedua adalah batu gamping pasiran
  - Lapisan ketiga adalah lapisan batu gamping kristalin
3. Lapisan pertama mempunyai ketebalan erkisar antara 5.63 m hingga 7.35 m, lapisan kedua dengan keebalan berkisar antara 0.0 m hingga 20.81 m dan berada pada kedalaman antara 5.65 mdan 7.35 m hingga26.41 m dan lapisan ketiga hingga batas deteksi 6.30 m hingga 30.72 m.
  4. Lapisan pertama mempunyai perlapisan yang relative rata. Lapiian kedua mempunya kemiringan ke arah barat dan lapisan ketiga perlapisannya searah dengan lapisan ke dua,

### Saran-saran

1. Untuk keperluan interpretasi tanpa harus melakukan pengeboran sebelumnya, perlu digunakan dua atau lebih metode kemudian dikorelasikan
2. Agar diperoleh hasil rekaman kecepatan penjalaran gelombang dan rekaman utama yang baik, maka penarikan tranduser pada saat pengukuran harus diusahakan kecepatannya tetap.

### DAFTAR PUSTAKA

- Budiono, K., dkk., 1982 “*Laporan Percobaan Alat SIR System 4*”, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bidang Geologi Khusus, pp. 1 – 11.
- Cai, J., et all., Januari – Pebruari 1995 “*Ray-based Synthesis of Bistatic Graound-*

- Penetrating Radar Profiles”, *Geophysics*, Vol. 60 No.1,1995, pp. 81 – 96.
- Fisher E., et all., March 1992 “Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data”, *Geophysics* Vol.57. No.3, pp. 495 – 504.
- Geophysical Survey System. Inc., 1971
- “Measurement of velocity of propagation and dielektrik constan”. Pp.1 – 10.
- Liner C. L., Januari 1995 “ Ground-penetrasi radar : A near-face experience from Washington County, Arkansas”,
- Murjono, 1993 “Elektromagnetika”, Sari Buku Schaum, Penerbit Erlangga, pp. 158