

Simulasi Perambatan Gelombang Georadar (GPR) pada Suatu Media Berlapis

Agus Suprianto

Abstract: The simulation of the wave propagation of the radar in the sub-surface was very important to be understood before being carried out of field acquisition, to maximize the design of the acquisition and to optimized radar gram data's. One of the approaches in the simulation of the data was to use propagation modeling of the electromagnetic wave by using the Finite Difference Time Domain solution (FDTD). Modeling of electromagnetic wave propagation in the GPR requires a solution of Maxwell's equations or present a finite-difference time-domain (FDTD) solution of Maxwell's that permit accurate computation of the radiated field from a transmitting antenna. Propagating through the air-earth interface, scattering by subsurface targets and reception of the scattered fields by receiving antenna. This technique is second-order accurate in time and fourth-order accurate in space. In this paper, I demonstrate the synthetic radar gram by applying this technique to two-dimensional examples from a subsurface of stratified media.

Keywords: Ground Penetrating Radar, stratified media, FDTD Methods

PENDAHULUAN

Metode Georadar merupakan salah satu metode elektromagnetik yang banyak digunakan untuk eksplorasi kondisi bawah permukaan dangkal yang banyak digunakan di bidang eksplorasi geologi dan geofisika, sumberdaya alam, rekayasa (teknik sipil), arkeologi dan lain-lain. Dalam metode Georadar ini digunakan antenna *transmitter* dan *antenna receiver* yang diletakkan pada permukaan area yang diteliti. *Antenna transmitter* berfungsi untuk meradiasikan gelombang elektromagnetik ke dalam tanah/lapisan dan *antenna receiver* berfungsi sebagai penangkap gelombang pantul dari *antenna transmitter* yang

dipantulkan oleh bawah permukaan akibat kontras impedansi dalam lapisan bawah permukaan.

Respon kondisi bawah permukaan terhadap gelombang yang melewati lapisan sangat bervariasi dan penting untuk dipahami sebelum dilakukan akuisisi di lapangan. Simulasi penjalaran gelombang pra akuisisi data diharapkan akan mampu mengoptimalkan desain akuisisi data lapangan yang akan dilakukan.

Pendekatan yang dilakukan dalam simulasi perambatan gelombang georadar diantaranya menggunakan metode numerik. Banyak sekali metode numerik yang digunakan sebagai pendekatan dari

perambatan medan elektromagnetik ini, diantaranya oleh Banos (1966) yang juga sebagai pioner dalam memodelkan radiasi medan dalam bidang batas penghantar, Annan (1973) menggunakan model analisis normal dan integrasi *saddle-point* untuk memecahkan radiasi medan gelombang, dan beberapa paper yang telah dipublikasikan yang menggunakan metode numerik untuk memecahkan medan teradiasi dari antena sederhana dekat bidang batas dua lapisan dielektrik yaitu Chew dan Kong, 1981; Bannister, 1982; Engheta et al., 1982; Tsang et al., 1973; Smith, 1984; pemantulan oleh suatu obyek yang terpendam (Peters dan Richmond, 1982; Mahmoud et al., 1981), dll.

Salah satu metode untuk memodelkan propagasi gelombang elektromagnetik adalah menggunakan metode *finite-difference time-domain* (FDTD) yang merupakan teknik untuk memodelkan medan elektromagnetik yang pertama kali diperkenalkan oleh Yee (1966) menggunakan pendekatan persamaan curl Maxwell dan merupakan suatu pendekatan *modelling* yang akurat dalam memecahkan fenomena elektromagnetik. Teknik FDTD ini sangat unik dan akurat dalam

memodelkan pemantulan dari target terpendam, seperti pipa, tangki terpendam, logam terpendam dan lain-lain. (Roberts. et al., 1997), yang dalam penelitian ini diaplikasikan pada kondisi bawah permukaan yang berlapis dengan profil cepat rambat lapisan terhadap gelombang yang berbeda-beda.

Teori Finite-Difference Time-Domain (FDTD)

Semua gejala elektromagnetik, atas skala makroskopis, digambarkan oleh persamaan tenar Maxwell. Yee (1966) membangun teknik FDTD dengan mengimplementasikan pendekatan beda hingga orde dua pada persamaan curl Maxwell. yang dimulai dengan persamaan Maxwell pada persamaan (1) dan (2) di bawah ini,

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \times H - J \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \times E \quad \dots\dots\dots (2)$$

dimana ε adalah permitivitas dielektrik (F/m), E adalah intensitas medan listrik (V/m), H adalah intensitas medan magnet (A/m), J adalah rapat arus (A/m^2), μ permeabilitas magnet (H/m) dan t adalah waktu (s).

Kedua persamaan di atas mengandung penurunan secara spasial dan temporal dan E , H dan J adalah besaran vektor. Besaran vektor dari persamaan di bawah ini

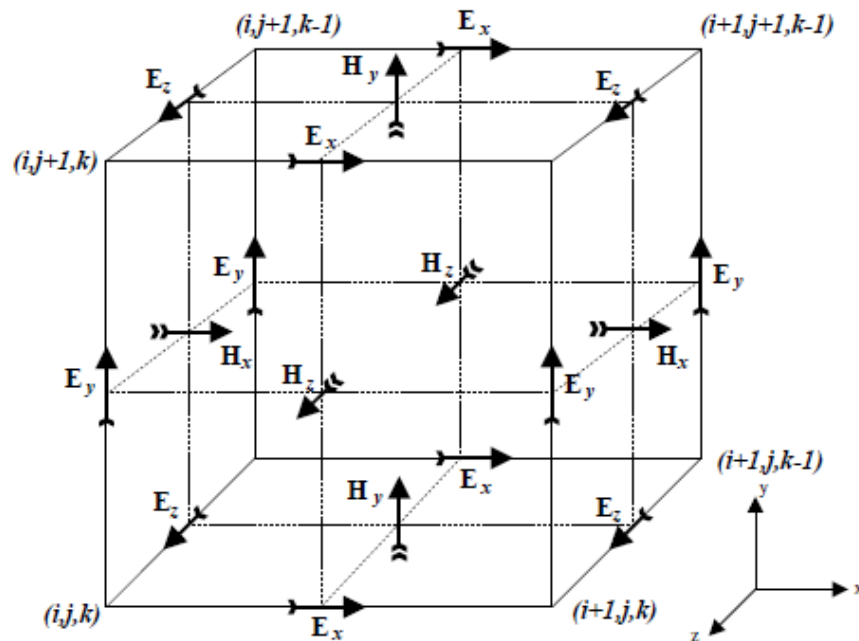
$$E = E_x^t(x, y, z)\hat{x} + E_y^t(x, y, z)\hat{y} + E_z^t(x, y, z)\hat{z} \dots\dots\dots (3)$$

$$H = H_x^t(x, y, z)\hat{x} + H_y^t(x, y, z)\hat{y} + H_z^t(x, y, z)\hat{z}, \dots\dots\dots (4)$$

dimana E_x , E_y , E_z , H_x , H_y , dan H_z adalah nilai skalar medan listrik dalam komponen vektor medan listrik dalam arah x , y , dan z , yang ditunjukkan oleh unit vektor $\hat{x}$, $\hat{y}$ dan $\hat{z}$.

memiliki ketergantungan terhadap ruang dan waktu, total vektor medan listrik dan magnet dalam koordinat kartesian dapat dituliskan sebagai berikut,

Yee (1966) melakukan pendekatan dengan cara mendiskritisasi suatu volume dalam sel-sel kecil dan menandai besaran-besaran skalar dan vektor pada masing-masing sel, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1 di bawah ini,



Gambar 1. Model unit sel FDTD oleh Yee. Medan listrik dan magnet merupakan tangen dari vektor-vektor yang dibentuk oleh masing-masing medan di atas. (Yee, 1966)

Nilai spasial dan temporal yang terdiskritisasi adalah sebagai berikut,

$$x = i \Delta_x \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$y = j \Delta_y \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$k = k \Delta_z \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$t = n \Delta_t \quad \dots\dots\dots (8)$$

dimana i, j, k adalah susunan grid/ cacahan sel-sel, n adalah step waktu, $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ adalah dimensi dari cacahan sel-sel, dan Δ_t adalah pertambahan step waktu.

Simulasi algoritma FDTD yang diterapkan ini diimplementasikan pada bidang 2 dimensi (bidang X-Y). Posisi sumber atau output dari simulasi dalam bidang berkaitan dengan koordinat dari sel-sel, dimana komponen-komponen medan elektromagnetiknya (dalam bidang) ditunjukkan oleh persamaan berikut,

$$\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}\right) \text{ untuk } E_z \dots\dots\dots (9)$$

$$\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y\right) \text{ untuk } H_x \dots\dots\dots (10)$$

$$\left(x, y + \frac{\Delta y}{2}\right) \text{ untuk } H_y \dots\dots\dots (11)$$

Besaran E_x dan H_y dapat dihitung dengan mensubstitusi persamaan (3) dan (4) ke dalam persamaan (1) dan (2) sehingga diperoleh,

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \nabla \times H \cdot \hat{x} - J_x \dots\dots\dots (12)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = -\nabla \times E \cdot \hat{y} \dots\dots\dots (13)$$

Dengan memasukkan pendekatan beda hingga E_x dan H_y pada persamaan (14) di bawah ini ke persamaan (12) dan (13) untuk n dan $n+1/2$,

$$J_x^{n+1/2} = \sigma E_x^{n+1/2} \approx \frac{\sigma(E_x^n + E_x^{n+1})}{2} \dots\dots(14)$$

$$\nabla \times H^{n+1/2} \cdot \hat{x} \approx \frac{H_z^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} \dots\dots\dots (15)$$

$$- \frac{H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z},$$

$$\nabla \times E^n \cdot \hat{y} \approx \frac{E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1\right) - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta z} \dots\dots\dots (16)$$

$$- \frac{E_z^n\left(i + 1, j, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta x},$$

$$\frac{\partial E_x^{n+\frac{1}{2}}}{\partial t} \approx \frac{E_x^{n+1} - E_x^n}{\Delta t} \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{\partial H_y^n}{\partial t} \approx \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}} - H_y^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \dots\dots\dots (18)$$

dimana σ adalah konduktivitas dalam siemens/meter (S/m) pada titik tertentu dalam cacahan. Persamaan (19) dan (20) yang

diberikan di bawah ini adalah pendekatan beda hingga dari besaran H_y dan E_x pada lokasi ruang

$$\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) \text{ dan } \left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)$$

untuk langkah waktu $n + \frac{1}{2}$ dan $n+1$, yang berkenaan dengan cacahan beda hingga,

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) = H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right)} \times \left[\frac{E_z^n\left(i + 1, j, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta x} - \frac{E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1\right) - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta z} \right] \dots(19)$$

$$E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) = \frac{2\varepsilon\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - \sigma\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)\Delta t}{2\varepsilon\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) + \sigma\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)\Delta t} E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) + \frac{2\Delta t}{2\varepsilon\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) + \sigma\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)\Delta t} \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \right] \dots(20)$$

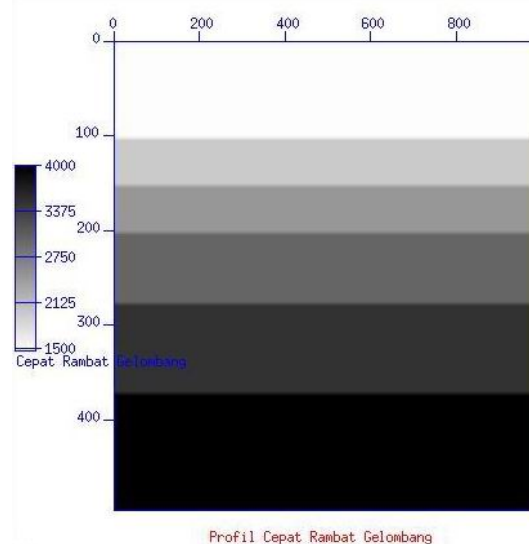
Untuk kasus dalam problem ruang 3-D, aproksimasi beda hingga dari besaran E_y , E_z , H_x dan H_z dapat diimplementasikan dengan cara yang sama.

Parameterisasi Model

Model lapisan yang dibuat terdiri dari enam lapis dan masing-masing lapisan mempunyai profil cepat rambat gelombang (dalam m/dt) yang berbeda-beda seperti ditunjukkan oleh Gambar 2 di bawah ini. Dengan asumsi bahwa densitas lapisan yang lebih tinggi berada pada strata lapisan bawah, model yang dibuat mempunyai profil cepat rambat gelombang yang

semakin tinggi ke bawah dengan asumsi berkorelasi dengan densitas lapisan yang lebih besar. Lapisan yang digunakan dalam parameterisasi model mempunyai profil cepat rambat gelombang antara 1500 – 4000 m/s yang terdistribusi dalam enam buah lapisan

Sebagai simulasi dalam radargram digunakan *wavelet* Ricker dengan frekuensi tengah 300 MHz dan dibangkitkan pada $z = 0$ meter. Untuk menghindari efek dispersi, perhitungan beda hingga menggunakan kurang dari 10 titik cacahan per panjang gelombang minimum.

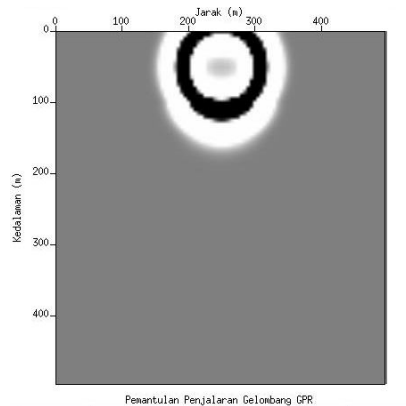


Gambar 2. Model lapisan bawah permukaan dua dimensi yang terdiri dari enam buah lapisan dengan profil cepat rambat gelombang yang berbeda-beda untuk masing-masing lapisan dengan nilai cepat rambat semakin tinggi ke arah lapisan lebih dalam.

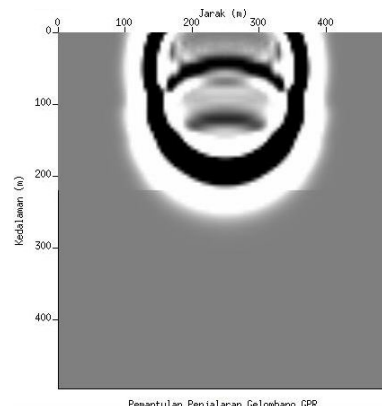
Hasil Simulasi

Hasil simulasi perambatan gelombang dengan metode FDTD

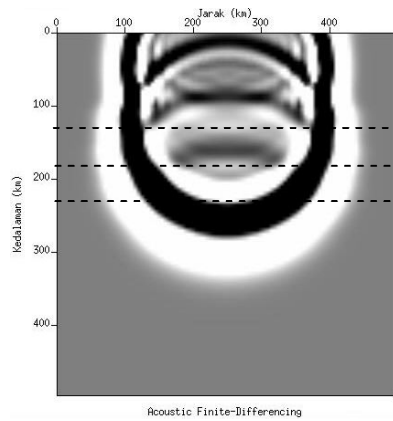
dari *radar section* pada suatu media berlapis enam lapis media ditunjukkan oleh Gambar 2 di bawah ini,



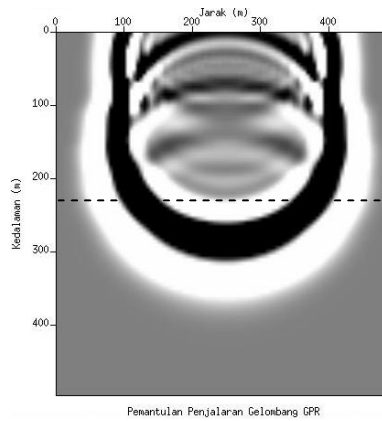
(a)



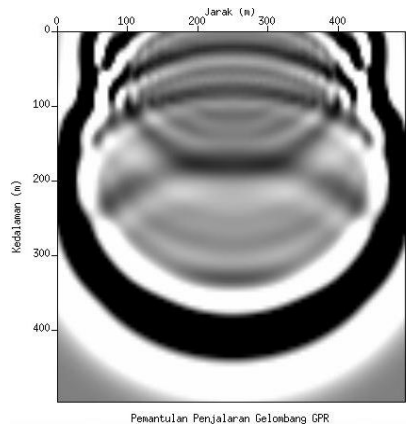
(b)



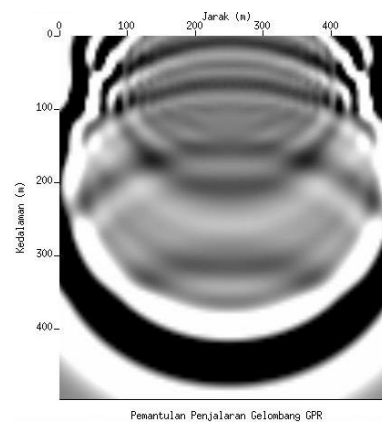
(c)



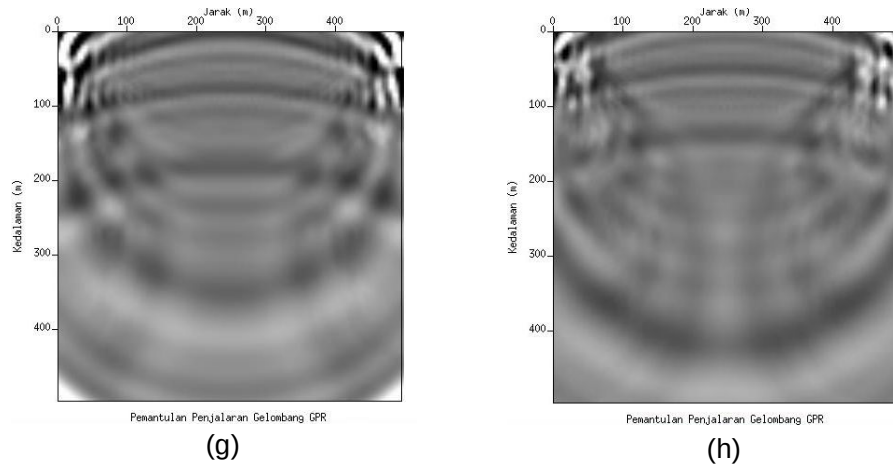
(d)



(e)



(f)



Gambar 3. Snapshot dari gelombang elektromagnetik yang dipancarkan (a, b, c, d, e, f, g dan h), yang menggambarkan evolusi dari gelombang elektromagnetik terhadap waktu.

Wavelet Ricker dari radargram digenerate/dibangkitkan dari tengah seperti ditunjukkan oleh Gambar 3 (a), dan gelombang merambat ke segala arah. Pada gambar 3 (a) gelombang yang dibangkitkan sesaat akan menyentuh reflektor yang pertama sehingga masih belum tampak pola pemantulan gelombang oleh lapisan. Pada gambar 3 (b) perambatan gelombang sudah mencapai reflektor medium ke 3 dan sudah dipantulkan oleh reflektor medium 1 dan 2. Perambatan gelombang telah mengalami pemantulan oleh keenam reflektor medium mulai terlihat pada *snapshot* gambar 3 (f). Dari hasil simulasi yang dilakukan, energi pantulan dari reflektor-reflektor yang lebih dalam

menunjukkan pengurangan, hal ini cukup realistis dengan kenyataan sebenarnya karena sebagian energi datang dari sumber terabsorpsi oleh lapisan-lapisan di atasnya. Dari hasil simulasi, pola penurunan energi ini teramati sebagai citra pantul *wavelet* yang semakin kurang tajam atau amplitudonya melemah. Dari hasil simulasi juga tampak bahwa propagasi gelombang pada bidang dengan kontras kecepatan yang berbeda jauh (antara lapisan pertama dengan udara) dengan perambatan gelombang dari medium rapat ke udara, akan terjadi fenomena pemantulan sempurna, artinya gelombang yang datang dari bawah akibat pemantulan oleh reflektor, akan dipantulkan kembali

ke bawah oleh bidang interface medium lapisan pertama dengan udara. Fenomena ini umumnya disebut dengan *multiple*, yang akan terbaca sebagai bidang lapisan dalam rekaman data akuisisi. Hal lain yang tampak dari hasil simulasi, di belakang gelombang pantul akibat pemantulan oleh medium terakhir diikuti oleh gelombang-gelombang lainnya yang bukan dari reflektor utama termasuk akibat fenomena *multiple*, sehingga dalam akuisisi sebenarnya agar fenomena-fenomena ini tidak terbaca sebagai bagian dari rekaman data, pengaturan lebar window perekaman perlu didesain sedemikian rupa.

KESIMPULAN

Hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa teknik FDTD dapat digunakan untuk memodelkan panjalaran/propagasi gelombang radar pada suatu media berlapis dengan cukup realistis. Dari hasil simulasi dapat dipertimbangkan kemungkinan-kemungkinan yang akan terjadi dengan propagasi gelombang selama akuisisi data.

DAFTAR PUSTAKA

- Robert, R.L., and Daniel, J.J., 1997, Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD methods: *Geophysics*, 62, 1114-1126.
- Yee, K.S., 1966, Numerical solution of the initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media: *IEEE Trans. Ant. Propag.*, 14, 302-307.
- Zeng, X., and McMechan, G.A., 1997, GPR Characterization of buried tanks and pipes: *Geophysics*, 62, 797-806.