

## DAFTAR ISTILAH

<i>Ground Penetrating Radar</i>	Radar atau sebuah alat yang digunakan untuk mendeteksi objek yang terkubur di dalam tanah dengan kedalaman tertentu menggunakan gelombang elektromagnetik.
<i>Ultra Wide Band</i>	Sistem komunikasi jarak pendek yang mempunyai bandwidth yang sangat lebar.
<i>Vector Network Analyzer</i>	Alat ukur yang digunakan untuk mengukur scattering parameter untuk koefisien pantul dan koefisien transmisi.

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang Masalah

Beton mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap pembangunan (kontruksi) di seluruh dunia, termasuk di Indonesia menurut Y. F. Kandi [1]. Dari pernyataan tersebut dapat disimpulkan perkembangan pembangunan di Indonesia dari tahun ke tahun berkembang dengan pesat. Oleh karena itu perlu adanya pengecekan kualitas beton untuk menunjang keberhasilan proyek. Pengecekan kualitas beton perlu dilakukan karena tidak semua hasil cetakan tercetak dengan sempurna serta kerusakan yang ada di dalam beton yang tidak bisa dilihat dengan kasat mata. Pengecekan yang dilakukan berupa penyelidikan visual untuk mengidentifikasi kerusakan pada beton khususnya *voids*, sehingga kerusakan tersebut dapat segera diperbaiki. *Voids* merupakan kerusakan pada beton yang berbentuk sebuah lubang berdimensi lebar dan letaknya berada di dalam beton, *voids* merupakan kerusakan yang bersifat struktural dan mengakibatkan daya tahan beton menjadi menurun serta dapat memicu kerusakan – kerusakan lain pada beton diantaranya retak dan karat pada besi tulangan beton [2]. Karena kerusakan di dalam beton tidak dapat dilihat dengan kasat mata, maka dibutuhkan media atau metode untuk membantu pengecekan.

Pada penelitian sebelumnya dijelaskan bahwa *voids* merupakan salah satu jenis kerusakan beton yang perlu dideteksi dan tidak dapat dideteksi tanpa menggunakan bantuan sebuah alat [2]. Metode *DC Electrochemical Method* diperoleh pada penelitian sebelumnya untuk mengetahui atau mendeteksi *voids*, retak, dan korosif [3]. Metode *Ground Penetrating Radar (GPR)* dilakukan pada penelitian sebelumnya untuk mendeteksi bentuk dua dimensi beberapa benda di bawah permukaan tanah dengan pemrosesan citra *B-Scan* [4]. Metode *Hummer Test* dilakukan pada penelitian sebelumnya, metode ini tidak mudah untuk diaplikasikan karena resolusi dan pengoperasiannya terbatas. Proses kalibrasi pada metode ini tergolong sulit, jika pada saat kalibrasi tidak dilakukan secara teliti maka tingkat keakurasian dari pengujian akan rendah [5].

Tugas Akhir ini mengusulkan metode GPR untuk deteksi *voids* non destruktif, karena metode ini menggunakan gelombang elektromagnetik yang memiliki rentang frekuensi yang sangat besar sehingga dapat meningkatkan akurasi dalam mendeteksi posisi dan jumlah kerusakan khususnya *voids*. Serta metode ini juga dapat menampilkan hasil deteksi ke dalam bentuk citra (1 dimensi, 2 dimensi, dan 3 dimensi).

## **1.2 Rumusan Masalah**

Konsep deteksi *voids* pada beton dengan GPR perlu diuji secara simulasi dalam bentuk olahan sinyal menjadi sebuah citra untuk identifikasi *voids* pada beton serta mengetahui efektifitas kemampuannya. Membuktikan secara eksperimental konsep deteksi *voids* pada beton, serta mengidentifikasi parameter-parameter yang mempengaruhi hasil simulasi maupun hasil eksperimen.

## **1.3 Tujuan dan Manfaat**

Tujuan Tugas Akhir yaitu untuk identifikasi pendeteksi *voids* dengan sistem GPR dan mendapatkan jumlah serta letak posisi objek secara akurat.

Manfaat yang diharapkan dari Tugas Akhir yaitu memberikan tambahan ilmu mengenai metode GPR yang dapat menggambarkan kerusakan pada benda uji. Selain itu dapat memberikan informasi kepada pihak terkait tentang mendeteksi kerusakan pada beton dan dapat diterapkan pada beberapa pembangunan di Indonesia sebagai langkah awal dalamantisipasi dan perbaikan kerusakan pada beton guna menunjang perkembangan pembangunan di Indonesia.

## **1.4 Batasan Masalah**

Dengan luasnya ruang lingkup permasalahan pada penelitian deteksi *voids* pada beton. Maka pada Tugas Akhir ini diberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut.

1. Simulasi dilakukan menggunakan metode FDTD dengan perangkat lunak bernama GPRMax.
2. Eksperimental lapangan yaitu dengan memodelkan GPR dengan tipe VNA (*Vector Network Analyzer*).

3. Beton untuk eksperimen dimodelkan dengan ukuran beton  $100 \times 100 \times 20\text{cm}$ . Sedangkan untuk simulasi beton dimodelkan dengan ukuran  $100 \times 100 \times 30\text{cm}$ .
4. *Voids* dimodelkan dengan sebuah bola ping-pong yang ditanam di dalam beton.

### 1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada Tugas Akhir ini yaitu:

1. Studi Literatur

Pemahaman konsep dan teori mengenai deteksi *voids* pada beton dibutuhkan beberapa referensi berupa artikel, buku dan jurnal yang mendukung proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

2. Simulasi

Simulasi menggunakan Aplikasi GPRMax.

3. Eksperimen

Eksperimen deteksi *voids* pada beton menggunakan objek yang dibuat sedemikian rupa sehingga menyerupai beton yang terdapat *voids* di dalamnya. Kemudian *voids* pada objek tersebut dideteksi menggunakan GPR dan hasil dari eksperimen tersebut dianalisis.

4. Analisis

Proses analisis yaitu menganalisis hasil eksperimen berupa sinyal keluaran GPR dan memprosesnya menjadi sebuah citra atau gambar menggunakan *Matrix Laboratory*.

5. Penulisan Laporan

Penulisan laporan dilakukan sebagai laporan atau bukti bahwa telah dilaksanakannya penelitian ini dan salah satu syarat untuk penyelesaian Tugas Akhir.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab 2 menjelaskan segala tinjauan pustaka mengenai pembuatan Tugas Akhir.

#### **2.1 *Ground Penetrating Radar (GPR)***

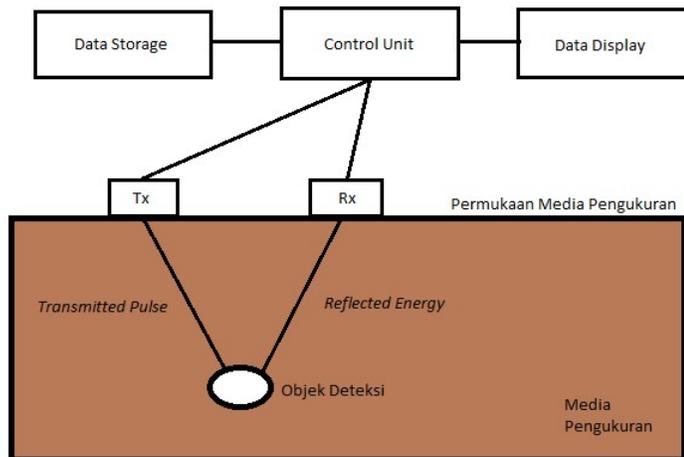
GPR adalah suatu sistem untuk mendeteksi objek yang terkubur di dalam tanah dengan kedalaman tertentu menggunakan gelombang elektromagnetik, biasanya dalam rentang frekuensi 10 - 1000 MHz [6].

GPR juga disebut sebagai *ground radar*, metode ini menampilkan tampilan struktur permukaan bawah tanah dengan resolusi tinggi. Prinsip GPR yaitu memancarkan gelombang elektromagnetik yang dibangkitkan oleh antena *transmitter*. Besar amplitudo dan kedalaman bergantung pada sifat kelistrikan dari batuan atau media dan frekuensi antena yang digunakan. Metode GPR dapat tergolong mudah untuk dilakukan sehingga cocok digunakan untuk mendeteksi struktur permukaan tanah atau struktur objek lain karena metode ini bersifat tidak merusak serta proses penerapan yang tergolong mudah dan memiliki tingkat ketelitian yang cukup tinggi [7].

Pada saat ini, GPR mulai diterapkan di berbagai negara. Pada awal berdirinya GPR, dan metode ini dapat secara akurat menemukan logam maupun non logam yang ada di dalam tanah. Metode ini selain diterapkan dalam bidang material geologi alam, sekarang GPR sudah diterapkan pada media lainnya seperti kayu, beton, dan aspal [8]. Metode yang sama dapat diterapkan dan bersifat tidak merusak, seperti pengujian struktur beton, pengaplikasian skala kedalaman objek yang diukur bervariasi dari sentimeter hingga kilometer. Bentuk pengukuran GPR yang paling umum yaitu adanya *transmitter* dan *receiver* yang digerakkan di atas permukaan benda yang diuji untuk mendeteksi pantulan sinyal dari fitur bawah permukaan benda uji tersebut [7].

### 2.1.1 Prinsip Kerja GPR

Teknik yang digunakan oleh GPR memanfaatkan pantulan gelombang elektromagnetik yang ditransmisikan ke permukaan tanah melalui perantara antenna [9].



**Gambar 2.1** Skema peralatan GPR.

Sistem GPR yang digunakan untuk mendeteksi terdiri dari *control unit*, antenna pengirim dan antenna penerima, peralatan *display*, dan penyimpanan data yang sesuai seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. *Control Unit* dari radar akan menghasilkan pulsa *trigger* yang tersinkronasi antara pengirim dan penerima di antenna. Pulsa *trigger* mengendalikan pengirim dan penerima untuk memperoleh contoh gelombang dari pulsa yang dipantulkan [9]. Antena pengirim menghasilkan gelombang elektromagnetik dan mengirimnya ke media yang akan diuji. Antena penerima mengkonversi sinyal terima menjadi nilai integer. Antena *receiver* berfungsi untuk menerima pulsa yang tidak terserap oleh bumi yang dipantulkan dalam *domain* waktu. *Mode* konfigurasi yang digunakan pada antenna *transmitter* dan *receiver* pada GPR terdiri dari dua cara yaitu bistatik dan monostatik. Cara bistatik yaitu digunakannya antenna terpisah untuk antenna *transmitter* dan *receiver* sedangkan cara monostatik yaitu yaitu digunakannya antenna yang sama untuk antenna pengirim dan penerima [6].

Kedalaman suatu objek dapat diukur antara selang waktu, dan pemancaran, serta penerimaan pulsa. Dalam selang waktu ini, terjadi pulsa bolak-balik dari antenna *transmitter* ke objek dan kembali lagi ke antenna *receiver*. Jika  $t$  adalah selang waktu, dan  $v$  adalah kecepatan propagasi gelombang elektromagnetik dalam tanah, maka  $h$  dinyatakan kedalaman objek adalah seperti ditunjukkan pada persamaan 2.1 [7] [10].

$$h = 1/2 \cdot t \cdot v \quad (2.1)$$

Kecepatan gelombang elektromagnetik dalam medium persamaannya ditunjukkan pada persamaan 2.2 [7] [10].

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

dimana  $v_m$ ,  $c$ , dan  $\epsilon_r$  adalah kecepatan propagasi medium, kecepatan cahaya, dan permitivitas relatif.

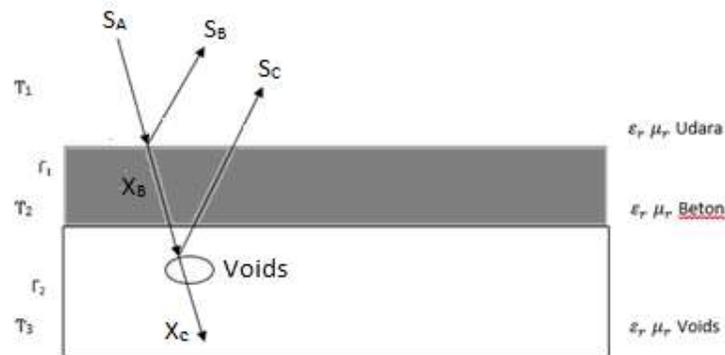
Pada ruang hampa, persamaan kecepatan propagasi gelombang elektromagnetik yaitu [7] [10]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.3)$$

dimana  $\epsilon_0$  dan  $\mu_0$  adalah permitivitas listrik ruang hampa ( $8.84 \times 10^{-12}$  F/m) dan permeabilitas magnetik ruang hampa ( $1.26 \times 10^{-6}$  H/m).

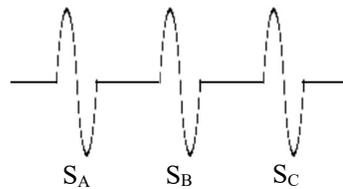
### 2.1.2 Sistem GPR

Pada sistem GPR memanfaatkan konsep dasar dari perambatan gelombang lintas medium. Pemantulan gelombang terjadi ketika gelombang melewati suatu medium yang memiliki nilai permitivitas relatif ( $\epsilon_r$ ) dan permeabilitas relatif ( $\mu_r$ ) berbeda. Pada eksperimen kali ini diketahui terdapat tiga medium yang berbeda diantaranya udara, beton, dan *voids*.



**Gambar 2.2** Pantulan gelombang elektromagnetik pada lintas medium.

Pada gambar 2.2, gelombang elektromagnetik yang dipancarkan  $S_A$  ke arah beton mengalami dua momen, dimana gelombang diteruskan  $X_A$  dan dipantulkan  $S_B$  yang diakibatkan karena adanya dua medium (udara dan beton) dan nilai permitivitas relatif ( $\epsilon_r$ ) yang berbeda. Gelombang elektromagnetik yang diteruskan mengarah *voids*, ketika gelombang mengenai *voids* terjadi perubahan medium (beton dan *voids*) dan nilai permtivitas relatif ( $\epsilon_r$ ) sehingga terjadi pemantulan gelombang  $S_C$  dan adanya gelombang yang diteruskan  $X_C$ .

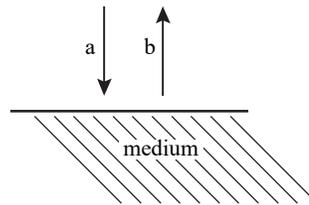


**Gambar 2.3** Pantulan yang diterima antena penerima.

$S_A$  merepresentasikan sinyal elektromagnetik mulai dipancarkan dari antena pengirim,  $S_B$  merepresantasikan pantulan sinyal ketika pertama kali mengenai permukaan dari beton karena memiliki karakteristik yang berbeda antara udara dan permukaan beton dan  $S_C$  merepresentasikan pantulan sinyal karena mengenai sebuah objek yang mempunyai karakteristik berbeda dengan beton yaitu *voids*.

Antena  $T_x$  akan memancarkan gelombang ke arah beton dan terjadi pantulan yang akan ditangkap pada antena  $R_x$  berupa  $S_A$ ,  $S_B$ , dan  $S_C$ , digambarkan pada gambar 2.3. Jika sinyal terima di  $R_x$  diwakilkan dengan  $S_R$ , maka dapat dituliskan kedalam persamaan 2.4

$$S_R = S_A + S_B + S_C \quad (2.4)$$



**Gambar 2.4** Hubungan koefisien pantul dan pemantulan.

Koefisien pantul ( $\Gamma$ ) merupakan perbandingan antara dua sinyal, yaitu sinyal pantul dan sinyal terima seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 dan persamaan 2.5.

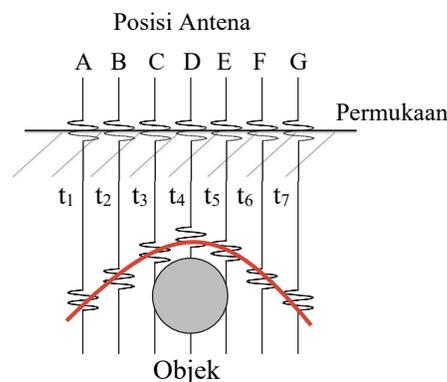
$$\Gamma = \frac{b}{a} \quad (2.5)$$

Jika koefisien pantul antara dua medium adalah ( $\Gamma_n$ ) dan impedansi intrinsik adalah ( $Z_n$ ) maka dapat dituliskan pada persamaan 2.6 dan 2.7.

$$Z_n = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_n}{\epsilon_0 \epsilon_n}} \quad (2.6)$$

$$\Gamma_n = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n} \quad (2.7)$$

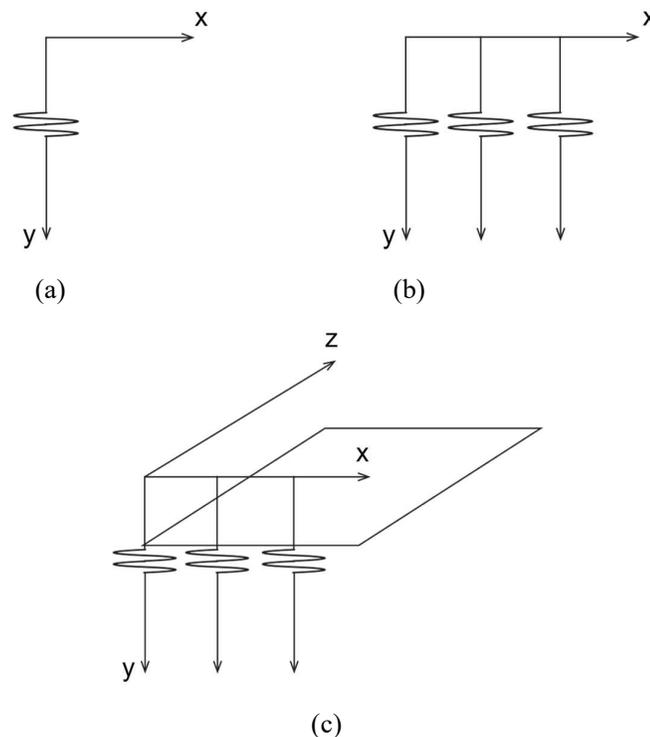
Pantulan gelombang yang diterima pada sisi penerima memiliki interval waktu yang berbeda – beda bergantung pada posisi antenna. Pada gambar 2.5 dijelaskan bahwa posisi antenna yang berada di titik atas objek akan memiliki selang waktu yang lebih cepat dibanding ketika posisi antenna tidak di atas objek ( $t_4$ ). Kumpulan dari hasil pantulan tersebut akan dibentuk seperti yang ditunjukkan garis merah pada gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Bentuk kumpulan hasil GPR.

### 2.1.3 Metode *Scanning*

Metode *scanning* pada eksperimen Tugas Akhir terdiri dari 3 bagian diantaranya *A-Scan*, *B-Scan*, dan *C-Scan* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. *A-Scan* (a) merupakan pemrosesan citra sinyal dalam bentuk satu dimensi yang bertujuan untuk mendapatkan 1 data informasi pada titik tertentu. *B-Scan* (b) merupakan sebuah tahap lanjutan dari proses *A-scan* atau dengan kata lain *B-scan* merupakan tahapan dimana citra dijadikan kedalam dua dimensi dengan memanfaatkan kumpulan *A-Scan*. Sedangkan *C-Scan* (c) sendiri pada dasarnya merupakan pemrosesan sinyal yang memiliki bidang  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  atau dengan kata lain merupakan pemrosesan citra tiga dimensi [11].



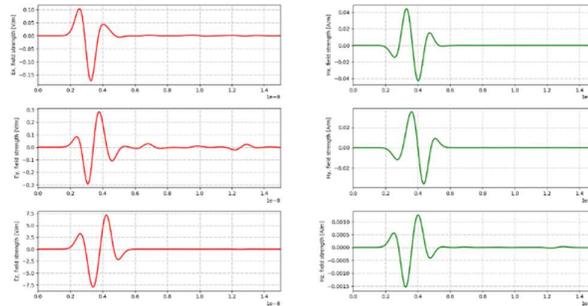
**Gambar 2.6** Skema *A-Scan* (a), *B-Scan* (b), *C-Scan* (c).

### 2.1.4 Pemrosesan Sinyal GPR

Hasil yang diinginkan dari penggunaan GPR yaitu sebuah citra atau gambar baik 1, 2, atau 3 dimensi. Gambar tersebut didapat dari kumpulan – kumpulan data yang diproses menggunakan teknik pemrosesan sinyal yang berbeda. Dari teknik pemrosesan sinyal yang berbeda – beda menghasilkan gambar yang berbeda pula [12].

### A-Scan

A-Scan atau biasa disebut pemrosesan data satu dimensi, dimana pada pemrosesan sinyal A-Scan dilakukan pembersihan sinyal pantul yang tidak diinginkan dari sinyal pantul atau yang biasa disebut dengan *clutter*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 [11].



**Gambar 2.7** Gambar sinyal A-Scan.

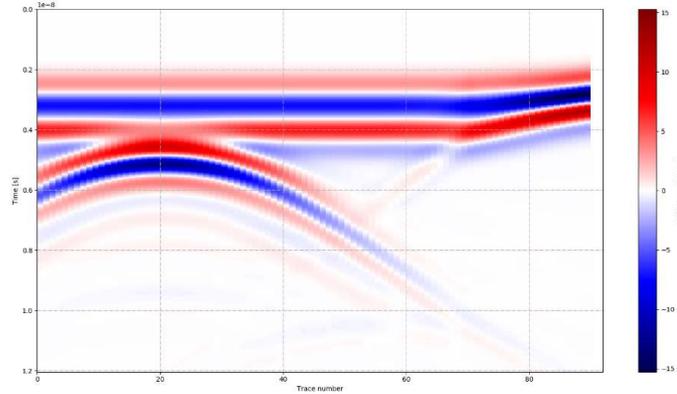
Dalam *domain* frekuensi, ini setara dengan produk konvolusi keduanya. Spektrum itu secara umum, mengarah ke pembesaran *band*. Efek ini, biasanya dapat dimitigasi secara memuaskan dengan menggunakan 1-D. Bentuk gelombang waktu yang diterima dapat digambarkan sebagai konvolusi dari sejumlah fungsi waktu seperti dijelaskan pada persamaan 2.8, masing-masing mewakili *respons impuls* dari beberapa komponen sistem radar. Selain kontribusi kebisingan dari berbagai sumber, maka diterima gelombang waktu sehingga dapat dinyatakan dengan [11]:

$$f_r(t) = f_s(t) \otimes f_c(t) \otimes f_{gf}(t) \otimes f_t(t) \otimes f_{gr}(t) \otimes f_{a2}(t) + n(t) \quad (2.8)$$

Dimana  $f_s(t)$ ,  $f_c(t)$ ,  $f_{gf}(t)$ ,  $f_t(t)$ ,  $f_{gr}(t)$ ,  $f_{a2}(t)$ ,  $n(t)$ , yaitu sinyal yang digunakan antenna, respon *crosscoupling* antenna, respon *impulse ground* (arah  $d$ ), respon *impulse target*, respon *impulse ground*, respon *impulse antenna*, *noise*.

### B-Scan

B-scan atau biasa disebut pemrosesan data dua dimensi. Merupakan konstruksi atau lanjutan dari pemrosesan sinyal A-Scan yaitu pembuatan citra atau gambar ke dalam bentuk dua dimensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8. Sinyal B-Scan akan menghasilkan gambar atau kualitas yang bagus jika sinyal pemrosesan sinyal A-Scan dilakukan dengan benar [11].



**Gambar 2.8** Gambar gelombang B-Scan.

Pemberian label Transformasi Fourier pada 2-D sebagai  $d(x, t)$  sehubungan dengan absis pengukuran dan waktu didefinisikan sebagai  $D(k, \omega)$ , dan filter 2-D paling umum yaitu dengan mengalikan spektrum ini dengan fungsi penyaringan  $H(k, \omega)$  untuk menghasilkan spektrum data filter  $D_F(k, \omega)$  dijelaskan pada persamaan 2.9 [11].

$$\widehat{D}_F(k, \omega) = H(k, \omega) \cdot D(k, \omega) \quad (2.9)$$

Secara khusus, menunjukkan lagi dengan  $D_f(k, \omega)$  yang di filter persamaan migrasi 2-D dalam *domain* frekuensi dinyatakan pada persamaan 2.10 [10]

$$(x', z') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{D}_F(k, \omega) \exp(jkx') \exp\left(jz' \sqrt{\frac{4\omega^2}{v^2} - k^2}\right) dk d\omega \quad (2.10)$$

Dalam *domain* waktu dinyatakan dengan pada persamaan 2.11 [10].

$$(x', z') = \frac{\partial}{\partial z'} \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{\frac{2\sqrt{(x-x')^2+z'^2}}{v}}^{+\infty} \frac{d_F(x, t)}{\sqrt{t^2 - \frac{4[(x-x')^2+z'^2]}{v^2}}} dt \quad (2.11)$$

### C-Scan

C-Scan atau biasa disebut pemrosesan data tiga dimensi. Pada dasarnya pemrosesan C-Scan memiliki bidang x, y, dan z. Sama halnya dengan B-Scan, sinyal C-Scan akan menghasilkan gambar atau kualitas gambar yang baik jika pada

tahapan pemrosesan sinyal B-Scan dilakukan dengan benar. Menambah pendekatan linear dari fenomena umumnya dilakukan juga dalam pemrosesan 3-D, dan dalam 3-D juga dimungkinkan untuk menentukan DT yaitu persamaan hubungan dan migrasi. Secara khusus, ekspresi untuk persamaan migrasi 3-D dapat dinyatakan dalam *domain* frekuensi dan domain waktu seperti yang dijelaskan pada persamaan 2.12 [11].

$$(x', y', z') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{D}_F(k_1, k_2, \omega) \times \\ \exp(jk_1 x') \exp(jk_2 y') \exp\left(jz' \sqrt{\frac{4\omega^2}{v^2} - k^2}\right) dk_1 dk_2 d\omega \quad (2.12)$$

Meskipun C-scan pada dasarnya adalah pada nilai Z atau rentang yang dipilih nilai Z, untuk lebih jelasnya dijelaskan pada persamaan 2.13. Namun penting untuk memfokuskan data jika tidak, fitur palsu akan muncul ke dalaman target yang akan diuji [11].

$$O(x', y', z') = \frac{\partial}{\partial z'} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d_F\left(x, y, \frac{2\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z'^2}}{v}\right)}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z'^2}} dx dy \quad (2.13)$$

## 2.2 Finite Difference Time Domain (FDTD)

FDTD merupakan metode numerik yang diperkenalkan oleh K Yee untuk memberikan solusi persamaan Maxwell secara diskrit. Fenomena – fenomena elektromagnetik dalam skala makroskopik dapat dijelaskan sangat baik dengan persamaan Maxwell seperti pada persamaan 2.14 – 2.17. Persamaan Maxwell merupakan persamaan diferensial orde pertama yang menekspresikan relasi antara dasar – dasar medan magnet dan kebergantungan terhadap sumbernya [14].

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J_c + J_s \quad (2.15)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.16)$$

$$\nabla \cdot D = qv \quad (2.17)$$

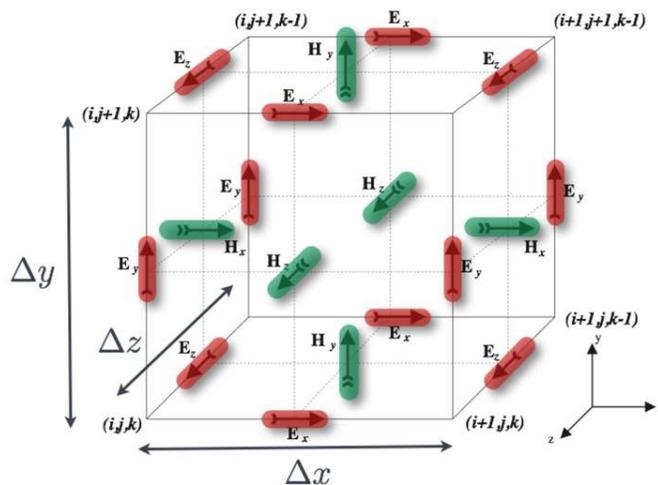
Dimana E melambangkan intensitas medan listrik, B merupakan rapat fluks medan magnet, H merupakan meda magnet, D merupakan rapat fluks medan listrik,  $J_c$  dan  $\rho_v$  menunjukkan arus konversi  $J_v$ . Waktu dalam satuan detik yang di simbolkan

dengan  $t$  dan  $q_v$  adalah kerapatan muatan volume dielektrik (*coulombs/cubic meter*). Dalam persamaan Maxwell, medan vektor diasumsikan menjadi nilai tunggal, batasanm dan fungsi kontinyu dari posisi dan waktu. Untuk merencanakan respon GPR dari target atau objek pada persamaan di atas harus diselesaikan dengan merujuk pada permasalahan geometri dan kondisi awal [14].

Pendekatan FDTD terhadap solusi numerik persamaan Maxwell adalah untuk mendiskritisasi ruang dan waktu secara kontinu. Jadi langkah-langkah diskritisasi  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  dan  $\Delta z$  memainkan peran yang sangat signifikan, karena semakin kecil mereka semakin dekat model FDTD dengan representasi nyata dari masalah. Salah satu parameter penting saat mendesain GPRMax adalah menentukan langkah diskritisasi. Dalam aturan praktis, langkah diskritisasi setidaknya sepuluh kali lebih kecil dari panjang gelombang terkecil dari medan elektromagnetik yang merambat. Panjang gelombang ( $\lambda$ ) didapat persamaan 2.18 [15].

$$\lambda = \frac{c}{f_m \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.18)$$

dimana  $\lambda$  dan  $f_m$  adalah panjang gelombang dan maksimum frekuensi.



**Gambar 2.9** Single FDTD Sel Yee menampilkan medan magnet (hijau) dan medan listrik (merah).

Pada dasarnya metode FDTD dipergunakan untuk memperbarui medan magnet dan medan listrik secara bergantian seperti yang ditunjukkan pada gambar