

PERANCANGAN DAN SIMULASI ANTENA BOWTIE DENGAN PEMBEBANAN RESISTIF UNTUK APLIKASI GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

Marisa Desmaliasari¹, Budi Prasetya², Dr Yuyu Wahyu Ir .³

¹Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

Abstrak

Saat ini perkembangan teknologi semakin banyak memanfaatkan subsurface (permukaan di bawah tanah) sebagai medianya. Untuk dapat mendeteksi objek yang terkubur di bawah tanah tanpa adanya proses penggalian tanah, diperlukan durasi pulsa yang sangat sempit agar dapat menghasilkan pulsa dengan kualitas yang baik. Selain itu diperlukan antenna dengan karakteristik bandwidth yang sangat lebar. Tentunya hal ini akan mengakibatkan late-time-ringing.

Untuk mengatasi masalah tersebut maka diciptakanlah suatu sistem yang dapat mendeteksi objek yang berada dibawah permukaan tanah tanpa harus melakukan penggalian, yaitu Ground Penetrating Radar (GPR). GPR bekerja dengan memanfaatkan pemantulan sinyal. Sistem GPR memiliki 2 buah antenna yang identik yang berfungsi sebagai antenna transmitter dan antenna receiver. Antenna ini haruslah memiliki karakteristik bandwidth yang lebar. Oleh karena itu, pada tugas akhir kali ini digunakan antenna bowtie yang memiliki karakteristik bandwidth extra lebar (UWB). Penambahan pembebanan resistif pada kedua lengan bowtie adalah karena penambahan pembebanan resistif mampu meredam pantulan balik yang terjadi di ujung antenna yang akan mengakibatkan late-time-ringing sehingga secara otomatis mengubah karakteristik sinyal dalam domain frekuensi. Jadi, semakin kecil late-time-ringing yang dihasilkan maka bandwidth antenna akan semakin lebar.

Pada akhirnya rancangan antenna bowtie ini dapat menekan nilai ringing yang terjadi. Selain itu, nilai VSWR yang dihasilkan untuk setiap antenna adalah ≤ 2 dan nilai ringing $\leq 10\%$, ini menunjukkan bahwa rancangan antenna bowtie pada tugas akhir kali ini sesuai dengan sistem GPR resolusi menengah. Dan untuk nilai bandwidth pada setiap rancangan antenna adalah ≥ 150 MHz, ini sudah memenuhi syarat ultra wideband. Secara keseluruhan menunjukkan bahwa antenna Bowtie dengan pembebanan resistif sesuai untuk di aplikasikan pada sistem GPR resolusi menengah.

Kata Kunci : GPR, antenna bowtie, ultra-wide band, late-time riging, resistif loading



Telkom
University

Abstract

Nowadays, the development of technology is getting more to utilize subsurface (surface of underground) as its medium. To be able to detect objects that are located at under ground level without digging the soil, it is needed a narrow duration of pulse in order to generate a good quality of pulse. In addition, it is also needed an ultra-wide band frequency. But, obviously it will cause a late-time-ringing.

To solve the problem then was created a system that can detect objects under the soil surface without a dig, which is Ground Penetrating Radar (GPR). GPR works by using the signal reflection. The GPR system having 2 identic antenna which function as transmitter and receiver antenna. These antennas need to have wide bandwidth characteristic. Therefore, this final project uses a bowtie antenna which has an ultra-wide band characteristic. The addition of resistive loading on those 2 arms of bowtie antenna can reduce the reflection signal which can cause a late-time-ringing, so that it changes the signal characteristic to frequency domain.

The bowtie antenna design also can surpress the ringing value. The VSWR value which is generated by this bowtie antenna is ≤ 2 and the ringing value becomes $\leq 10\%$. While the value of bandwidth in each designs of antenna is ≥ 150 MHz, and it meets the requirement of ultra wideband condition. In summary, those specifications above show that the bowtie antennas with resistive loading are suitable for middle resolution GPR System.

Keywords : GPR,bowtie antenna, ultra-wide band, late-time ringing, resistive loading

BAB II

DASAR TEORI

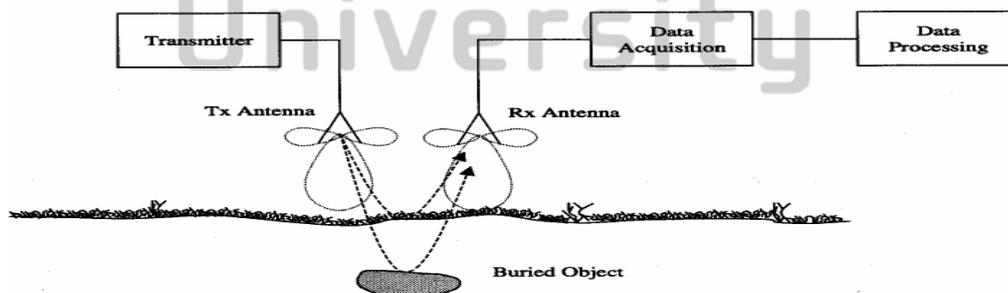
2.1 *Ground Penetrating Radar (GPR)*

Ground Penetrating Radar (GPR) mengacu pada sebuah metode dengan menggunakan teknik elektromagnetik yang di rancang dengan tujuan utama untuk mendeteksi objek yang terkubur atau berada di bawah permukaan tanah. Dengan GPR, informasi di bawah permukaan tanah (misalnya tentang keberadaan maupun letak dari sebuah objek, dan corak/karakteristik di dalam tanah) dapat diketahui tanpa perlu mengebor ataupun menggali tanah, dengan demikian penggunaan GPR dapat menghemat waktu dan tenaga.

Ground-penetrating radar (GPR) merupakan metode geofisika yang menggunakan pulsa radar untuk citra dibawah permukaan tanah. Menggunakan metode non-destruktif dengan radiasi elektromagnetik. GPR dapat digunakan dalam berbagai media, termasuk batu, tanah, es, air bersih, dan trotoar. Hal ini dapat mendeteksi objek, perubahan materi, rongga dan retakan dibawah permukaan tanah.

2.1.1 Prinsip Kerja GPR

Sistem GPR terdiri dari antenna pengirim yang terhubung ke sumber eksitasi pulsa, serta antenna penerima yang selanjutnya akan terhubung ke unit pengumpulan dan pengolahan data serta *display* sebagai tampilan outputnya. Antena pengirim dan antenna penerima merupakan antenna yang identik agar antenna penerima dapat menangkap sinyal yang dikirimkan oleh antenna pengirim. Berikut merupakan gambar blok diagram dari sistem GPR :



Gambar 2.1 Diagram Blok GPR

Untuk menghasilkan pendeteksian yang baik, suatu sistem GPR harus memenuhi empat persyaratan sebagai berikut:

1. Kopling radiasi elektromagnetik yang efisien ke dalam tanah
2. Penetrasi radiasi yang cukup ke dalam tanah dengan memperhatikan kedalaman dari target.
3. Mendapatkan sinyal hasil pantulan dari target dengan amplitudo yang cukup besar untuk proses deteksi pada atau di atas permukaan tanah.
4. Bandwidth yang cukup pada sinyal yang di deteksi, yang selanjutnya akan berhubungan dengan level noise dan resolusi yang diinginkan.

2.2 Antena untuk aplikasi GPR

2.2.1 Peranan Antena dalam aplikasi GPR

Antena memainkan peranan yang sangat penting dalam menentukan performansi sistem GPR. Secara umum, antena harus memenuhi kriteria tertentu yang ditentukan oleh spesifikasi sistem, yang sangat tergantung pada tujuan dan aplikasi yang ingin dicapai. Yang pertama harus mampu untuk mengukur amplitudo radar yang dipantulkan secara akurat, selanjutnya tinggal membedakan target dari *noise* dan *clutter*. Dalam GPR, antena berfungsi sebagai pengirim dan penerima sinyal pulsa dan selanjutnya meneruskan ke unit pengolahan sinyal untuk kemudian ditampilkan pada *display*. Antena pengirim dan penerima harus bersifat identik agar sinyal pulsa yang dikirim dapat diterima dengan baik oleh antena penerima.

2.2.2 Parameter Antena GPR

Untuk antena *impulse* GPR harus mempertimbangkan aspek-aspek berikut ini^[1]:

1. *Pertama*, karena antena GPR harus mampu mengirimkan pulsa dengan bandwidth yang sangat lebar (*ultra-wide-band*), hal ini akan menghasilkan apa yang disebut *late-time ringing*. Untuk mengirimkan pulsa tanpa *late-time ringing*, antena yang digunakan harus *ultra wide-band*.
2. *Kedua*, karena antena GPR biasanya beroperasi dekat dengan tanah (permukaan tanah) maka harus dapat mengirimkan medan elektromagnetik melalui *interface* udara-tanah secara efektif. Ini berarti antena harus memiliki kopling yang baik terhadap tanah untuk mentransfer energi yang lebih banyak ke dalam tanah dan

mengurangi radiasi ke udara. Akan tetapi, ketika antena diletakkan dekat dengan tanah, interaksi antena-tanah akan berpengaruh besar terhadap impedansi input antena, bergantung jenis tanah dan elevasi antenanya [Turner,1993]. Karena properti elektrik tanah sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, dalam survey GPR biasanya sangat sulit untuk menjaga kestabilan impedansi input karena jenis tanah yang benar-benar berbeda untuk setiap tempat dan kondisi cuaca yang berbeda. Ini mengakibatkan sulitnya mempertahankan kondisi *match*, antara antena dan *feed line* untuk memperkecil *mismatch loss*.

3. *Ketiga*, parameter medan jauh termasuk *Gain* dan pola radiasi tidak dipertimbangkan sebagai isu utama karena target biasanya terletak pada zona dekat atau menengah antena^[3].

2.3 Antena Ultra-Wideband (UWB)

Aplikasi *impulse* GPR melibatkan penggunaan pulsa sempit sebagai gelombang yang akan dipancarkan oleh antena penerima. Pulsa ini tentunya akan mempunyai lebar bidang frekuensi yang luas, karena dengan semakin sempit pulsa yang digunakan maka lebar bidang frekuensinya tentunya akan semakin besar. Disinilah diperlukan suatu antena yang dapat mempertahankan kestabilan pola radiasinya untuk rentang frekuensi yang sangat luas. Hal tersebut merupakan salah satu yang melatarbelakangi ide tentang penggunaan antena ultra *wideband* pada aplikasi *impulse* GPR.

2.3.1 Karakteristik unik UWB

Teknologi UWB memiliki beberapa karakteristik unik, antara lain:

1. Kemampuan pengintegrasian dengan biaya rendah.
2. Bandwidth RF yang sangat luas pada frekuensi yang relatif rendah.
3. Solusi rentang dan waktu yang sangat baik, walaupun melalui media *opaque dan lossy*.
4. *Gain* pemrosesan yang besar.
5. Mitigasi *grating lobe* dengan array antena.
6. Tidak berinterferensi dengan service lainnya yang ada.
7. Probabilitas yang rendah terhadap deteksi dan intersepsi.

2.3.2 Bandwidth antena UWB

Bandwidth antenna didefinisikan sebagai lebar bidang frekuensi kerja antenna yang dibatasi oleh VSWR dengan suatu nilai maksimum tertentu. *Voltage standing wave ratio* (VSWR) memberikan gambaran keuntungan untuk sistem saluran transmisi dengan rugi-rugi. Besaran ini didefinisikan sebagai:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \tag{2.1}$$

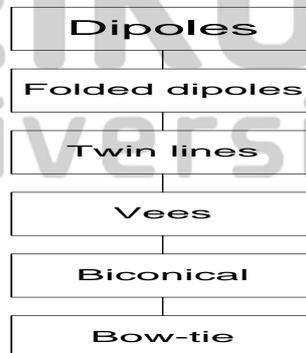
Dengan V_{max} didefinisikan sebagai tegangan maksimum gelombang dan V_{min} didefinisikan sebagai tegangan minimum gelombang pada spektrum sinyal yang digunakan. Nilai VSWR yang biasa digunakan adalah 1.1, 1.3, 2. Nilai VSWR = 2 ini biasanya yang dijadikan VSWR maksimum yang masih diperbolehkan untuk membatasi bandwidth antenna untuk sistem GPR.

Menurut definisi yang dikeluarkan oleh *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) pada tahun 1990, *ultra wideband* merupakan sistem dan sinyal yang *fractional-bandwidth*-nya lebih besar atau sama dengan 25%. Sedangkan *fractional bandwidth* itu sendiri didefinisikan sebagai berikut:

$$Fractional\ Bandwidth = \frac{2(f_H - f_L)}{(f_H + f_L)} \geq 25\% \tag{2.2}$$

dengan f_H didefinisikan sebagai batas frekuensi tertinggi dan f_L didefinisikan sebagai batas frekuensi terendah pada -10 dB dari spektrum sinyal yang digunakan.

2.4 Antena Bowtie

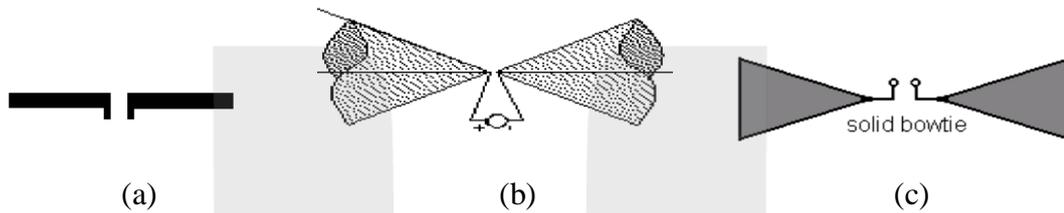


Gambar 2.2 Keluarga antenna Bowtie

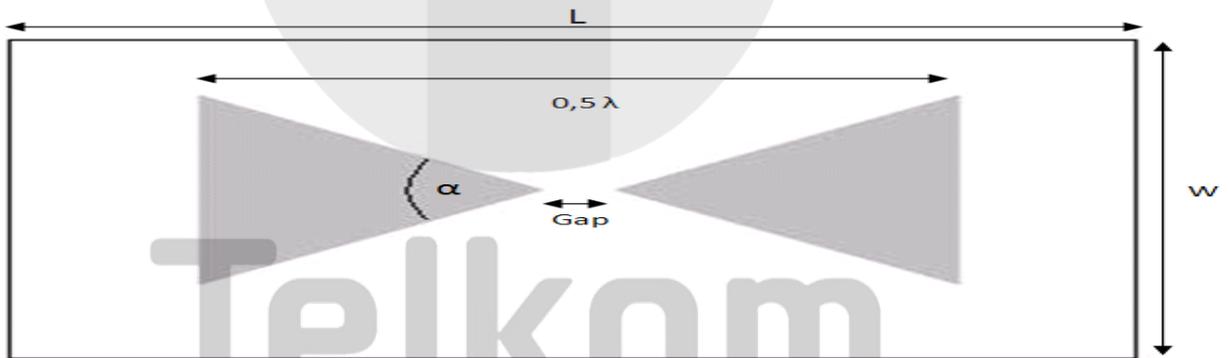
Antena *Bowtie* merupakan perkembangan dari antenna biconical dimana antenna biconical mengambil prinsip antenna dipole. Antenna biconical memiliki dimensi yang cukup besar terdiri dari dua buah corong berbentuk kerucut.

Alasan dibuatnya antenna *biconical* adalah karena antenna *biconical* memiliki karakteristik *bandwith* yang lebih besar daripada antenna *dipole* biasa.

Seiring perkembangannya, manusia selalu menginginkan dimensi yang lebih kecil dan sederhana untuk digunakan, oleh karena itu dibuatlah antenna *bowtie* yang memiliki bentuk seperti dasi kupu-kupu dimana memiliki karakteristik yang sama dengan antenna *biconical* namun memiliki dimensi yang lebih sederhana, yaitu terbuat dari bahan yang berupa lempengan logam.



Gambar 2.3Perkembangan antenna *dipole* hingga menjadi antenna *Bowtie* (a) antenna dipole (b) antenna biconical (c) antenna *Bowtie*



Gambar 2.4Perhitungan Dimensi Antenna *Bowtie*

Kelebihan utama dari *Bowtie* adalah desain yang sederhana dan impedansi yang lebar. Antenna *Bowtie* dibuat dengan dua buah lempeng segitiga yang terbuat dari logam dan diberi catuan di kedua sudutnya. Antenna jenis ini akan dipengaruhi oleh besar sudut dan memiliki frekuensi kerja yang bersifat bebas hanya jika panjang lengan segitiga tidak terbatas. Namun untuk membuat antenna *Bowtie* ini, kita harus memberi jarak antara dua lempeng segitiga tersebut dan panjang lengan kedua segitiga juga harus dibatasi. Hal ini

akan membatasi bandwidth. Panjang lengan antenna *Bowtie* pada tugas akhir ini adalah sebesar:

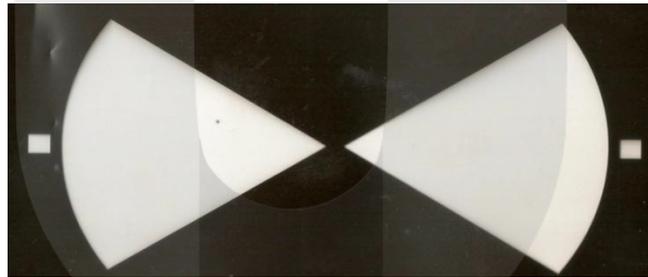
$$0.5 \lambda \tag{2.3}$$

dimana

$$\lambda = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \tag{2.4}$$

Antenna *Bowtie* memiliki polarisasi linear dan pola radiasi yang bidirectional dengan beam yang lebih lebar terletak pada daerah yang tegak lurus ground plane antenna. Hal ini terjadi karena *Bowtie* diletakkan diatas substrat dengan konstanta dielektrik yang cukup tinggi. Karena konstanta dielektrik yang cukup tinggi inilah sebagian besar antenna teradiasi ke sisi dielektriknya.

2.5 Pembebanan Resistif Pada Antena GPR



Gambar 2.5 Geometri antenna *bowtie* dengan 1 buah pembebanan resistif.



Gambar 2.6 Geometri antenna *bowtie* dengan 10 buah pembebanan resistif.

Pada aplikasi GPR, pulsa transient ditransmisikan ke dalam permukaan tanah dan informasi yang terkandung dalam radar yang kembali diproses untuk melihat target. Secara khusus, dalam aplikasi GPR untuk mendeteksi objek yang terkubur pada kedalaman yang dangkal, penting sekali untuk meradiasikan pulsa dengan *late-time ringing* yang minimal untuk menghindari efek masking pada target.

Late-time ringing, yang mengindikasikan karakteristik alami pada antenna *narrow-band*, umumnya disebabkan oleh *multiple reflection* antara ujung antenna dan *feed point*. Teknik yang paling banyak digunakan untuk memperbesar bandwidth antenna (sehingga memperkecil *late-time ringing*) adalah aplikasi pembebanan resistif, yang disebut Wu-King *profile*^[11], dapat digunakan untuk menentukan distribusi pembebanan di sepanjang antenna.

Kerugian utama diterapkannya pembebanan resistif adalah bahwa pembebanan resistif ini menurunkan efisiensi radiasi sampai 23% bahkan bisa lebih rendah lagi^[8]. Untuk menghindari kekurangan ini penggunaan pembebanan reaktif yang *non-dissipative* telah diusulkan. Nyquist dan Chen [1968] mengusulkan menyisipkan pasangan elemen lumped reaktif untuk memperlebar bandwidth antenna pada frekuensi tertentu dengan menempatkan elemen pada jarak yang optimal dari ujung antenna. Beberapa peneliti telah mengusulkan metode yang lebih baik menggunakan pembebanan kapasitif yang terdistribusi dengan *profile* pembebanan yang berbeda, termasuk *profile* konstan [Mushieke,1956], linear [Hallen,1962], dan eksponensial [Rao,1969]. Selain itu, kombinasi pembebanan resistif dan kapasitif dengan Wu-King [Kanda,1983] penentuan *profile* secara empiris [Paunovic,1977] juga telah diperkenalkan. Ini telah dibuktikan bahwa secara teoretis pembebanan kapasitif menjaga efisiensi tetap 100%, kombinasi antara pembebanan resistif dan kapasitif memberikan efisiensi radiasi antara 40% sampai 60% (tergantung *profile* yang digunakannya), dan pembebanan resistif menurunkan efisiensi radiasi sampai 30% [Montoya,1996-a]. Namun demikian, telah ditunjukkan bahwa pembebanan resistif merupakan salah satu teknik yang paling efektif untuk menekan *late-time ringing*, sedangkan pembebanan kapasitif (sendiri ataupun dalam kombinasi dengan pembebanan resistif) masih menghasilkan level *ringing* yang relatif tinggi [Montoya,1996-a]. Selanjutnya, kesulitan dalam praktik realisasinya *profile* pembebanan non-linear (seperti, Wu-King) pada struktur planar seperti antenna bowtie telah ditunjukkan [Shlager,1994].

2.6 Gambaran umum metode FDTD

Metode *finite-difference* merupakan metode diskritisasi lokal yang digunakan untuk menghasilkan nilai numerik kuantitas medan yang memberikan karakteristik beberapa kondisi fisik dalam ruang waktu. Metode ini sudah banyak dikembangkan untuk kondisi fisik yang memiliki kuantitas medan yang memenuhi sistem persamaan

diferensial parsial yang dalam beberapa kasus ditambahkan oleh kondisi pelengkap (*boundary condition, causality condition, compatibility relation*, dan semacamnya). Nilai numerik yang relevan dibangun di dalam domain tertentu yang dibatasi dalam ruang waktu sehingga disebut domain komputasi.

Metode FDTD diperkenalkan pertama kali oleh Kane S. Yee pada tahun 1966. Metode FDTD merupakan pendekatan untuk menyelesaikan permasalahan persamaan Maxwell melalui diskretisasi domain waktu dan domain ruang. Meskipun Yee mempublikasikan metode FDTD pada tahun 1966, namun metode ini tidak langsung mendapat popularitas, persoalan utamanya adalah keterbatasan teknologi komputer (kecepatan CPU dan kapasitas memori) yang ada pada saat itu.

Metode FDTD merupakan metode yang paling populer dan paling banyak digunakan dalam simulasi elektromagnetik karena keunggulan yang dimilikinya, beberapa keunggulan tersebut ialah:

1. FDTD bekerja pada domain waktu sehingga sangat efektif digunakan pada sistem yang menggunakan pulsa gaussian sebagai sumber eksitasi. Dengan metode inirentang frekuensi bisa dipecahkan dengan sekali simulasi. FDTD tepat untuk sistem dimana frekuensi resonannya tidak diketahui secara eksak.
2. FDTD memungkinkan pengguna untuk mendefinisikan sifat material pada semua titik di dalam daerah simulasi.
3. FDTD bekerja pada range frekuensi yang sangat lebar, berbagai kondisi medium, objek, dan respon lokasi.
4. Memiliki fleksibilitas yang tinggi.

Sedangkan kelemahan dari metode FDTD yaitu :

1. FDTD hanya bisa bekerja pada domain waktu.
2. Memerlukan resource komputer yang handal.
3. Stair casing dapat mengurangi tingkat keakurasian dari simulasi.

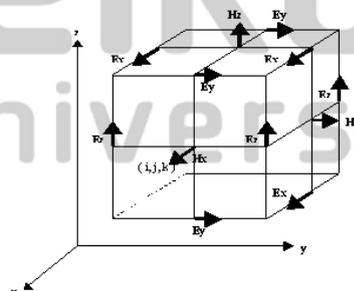
2.6.1 Algoritma Yee

2.6.1.1 Ide Dasar

Pada Tahun 1966, Kane S. Yee menurunkan persamaan *finite-difference* untuk persamaan *curl Maxwell* pada kasus material tanpa rugi-

rugi $\rho^*=0$ dan $\sigma=0$. Algoritma Yee memiliki banyak keunggulan karena mengandung hal-hal fundamental berikut :

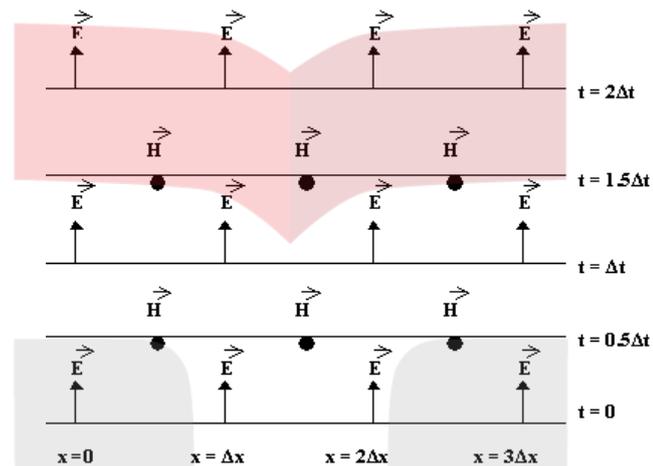
1. Algoritma Yee memecahkan permasalahan medan listrik dan medan magnet dalam domain waktu dan domain ruang menggunakan persamaan *curl* Maxwell secara simultan. Dengan menggunakan informasi E dan H, solusi yang dihasilkan lebih akurat daripada menyelesaikan secara terpisah.
2. Algoritma Yee menggambarkan komponen E dan H dalam ruang tiga dimensi, dimana setiap komponen E dikelilingi oleh empat komponen H, dan begitu juga sebaliknya setiap komponen H dikelilingi oleh empat komponen E, seperti diilustrasikan pada gambar 2.7. Dari gambar tersebut dapat ditentukan komponen medan listrik E yang terkait dengan arus pergeseran (*displacement current*) dengan adanya loop medan magnet H, begitu pula dengan komponen medan magnet H yang terkait dengan fluks magnet dengan adanya loop medan listrik E. Kontinuitas dari tangensial E dan H dapat tetap dipertahankan walau pun melalui material yang berbeda jika *interface*-nya sejajar dengan salah satu sumbu koordinat. Dalam hal ini tidak diperlukan cara khusus untuk menyesuaikan medan di bidang batas, tetapi cukup menentukan permitivitas dan permeabilitas di lokasi setiap komponen medan. Letak komponen E dan H pada kisi-kisi dan operasi central difference terhadap komponen tersebut secara eksplisit sesuai dengan hukum Gauss yang menyatakan tidak adanya muatan listrik dan magnet pada ruang bebas yang dimodelkan.



Gambar 2.7 Posisi komponen vektor medan listrik dan medan magnet dalam sel

3. Algoritma Yee juga menggambarkan komponen E dan H dalam domain waktu, seperti diperlihatkan gambar 2.8. Semua penghitungan

komponen medan E dalam ruang tiga dimensi disimpan dalam memori komputer menggunakan data H yang telah tersimpan lebih dahulu dalam memori komputer. Kemudian komponen medan H dapat dihitung dengan menggunakan data E yang baru saja dihitung. Proses ini berlanjut sampai dengan langkah waktu yang diinginkan tercapai.



Gambar 2.8 Peletakan medan listrik dan medan magnet pada ruang dan waktu

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan simulasi dan realisasi antenna *bowtie* dengan pembebanan resistif dan tanpa pembebanan resistif maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Rancangan antenna *bowtie* dengan pembebanan resistif cocok untuk aplikasi GPR.
2. Dengan pembebanan resistif profil Wu-King, level ringing yang didapat untuk setiap antenna adalah $\leq 10\%$, sehingga memenuhi standar untuk GPR resolusi menengah.
3. Nilai VSWR untuk setiap antenna ≤ 2 , ini menunjukkan bahwa rancangan antenna *bowtie* ini sesuai dengan standart antenna untuk sistem GPR.
4. Semakin jauh jarak antara antenna dengan sensor penerima maka Amplitudo peak-to-peak yang diterima akan semakin kecil.
5. Dengan pembebanan resistif profil Wu-King dapat meningkatkan *bandwidth* sampai dengan 537.3 MHz sehingga memenuhi syarat *ultra wide band*.
6. Pembebanan resistif mempengaruhi nilai VSWR. Semakin banyak jumlah komponen resistor yang di bebaskan ke antenna, maka akan semakin kecil VSWR yang dihasilkan.
7. Pembebanan resistif tidak berpengaruh terhadap impedansi input yang dihasilkan, yang mempengaruhi nilai darii mpedansi input adalah geometri dari antenna yang digunakan.

5.2 Saran

Adapun saran – saran yang sekiranya dapat membantu dalam pengembangan antenna *Bowtie* dengan *resitif loading* ini adalah

1. Dalam simulasi FDTD pergunakanlah ukuran sel Yee yang kecil sehingga pengaruh stairchasing dapat ditekan dan tingkat ketelitian juga lebih baik.
2. Gunakanlah teknik pembebanan selain pembebanan resistif agar dapat lebih menekan ringing dan mempertahankan efisiensi pulsa utama yang dihasilkan.
3. Rancanglah Antena *bowtie* dengan lebar pulsa yang berbeda agar dapat digunakan untuk resolusi yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] **A. A. Lestari**, *Antennas For Improved Ground Penetrating Radar: Modeling, Tools, Analisis And Design*, Ph.D.Dissertation, ISBN 90-76928-05-3, Delft University of Technology, The Netherlands, 2003.
- [2] **A. A. Lestari, A.G. Yarovoy, L. P. Ligthart**, *Adaptive Antenna for Ground Penetrating Radar* , Delft University of Technology, The Netherlands.
- [3] **A. A. Pramudita, A. Kurniawan, A.B. Suksmono, A.A. Lestari**, “*Footprint Adjustment On SFCW-GPR with Modified Dipole Array*”, *IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications*, pp.639-643, 2007.
- [4] **A.A.Lestari, D.Yulian, A.B.Sukmono, E.Bharata, A.G.Yarovoy, and L.P.Ligthart**, *Rolled Dipole Antenna for Low-resolution GPR*, *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2007*, Beijing, China.
- [5] **D.J.Daniels**, *Ground Penetrating Radar 2nd edition*, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- [6] **D.J.Daniels**, *Surface-Penetrating Radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- [7] **G. Mur**, *User’s Guide for FDTD3D; The C++ Finite-Difference Code for Electromagnetic Fields in Three Dimensions and Time*, IRCTR and Laboratory for Electromagnetic Research, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, May 2000.
- [8] **J.G.Maloney, G.S.Smith**, “A study of transient radiation from the Wu-King resistif monopole-FDTD analisis and experimental measurements’, *IEEE Trans.Antennas Propagat.*, vol.41, no.5, pp.668-679, May 1993.
- [9] **Panuntun, Tulus Widhi**. 2010, *Perancangan dan Realisasi Antena Wire Bowtie untuk Aplikasi Ground Penetrating Radar (GPR) Menggunakan Metode FDTD*, Tugas Akhir, Institut Teknologi Telkom,

- Bandung.
- [10] **Sibarani, Herry Gunawan**, 2010, *Perancangan dan Simulasi Antena Rolled Dipole Array untuk Aplikasi Ground Penetrating Radar (GPR) dengan Footprint yang Dapat Berubah Menggunakan Metode Finite-Difference Time-Domain (FDTD)*, Tugas Akhir, Institut Teknologi Telkom, Bandung.
- [11] **T.T.Wu, R.W.P.King**, "The cylindrical antenna with non reflecting resistive loading", *IEE Trans.Antennas Propagat.*, vol.AP-13, no.5, pp.369-373, May 1965.
- [12] **Tetuko, Yosafat**. *Antaran Hantaran Gelombang Listrik Magnet dengan Menggunakan Metode FDTD*. BPPT, 1988.
- [13] **TP.Montoya, G.S.Smith**, "A study of pulse radiation from several broad-band loaded monopoles", *IEE Trans.Antennas Propagat.*, vol.44,no.8,pp.1172-1182,Aug.1996-a.
- [14] *Loss*, http://id.wikipedia.org/wiki/Kehilangan_balik. diakses tanggal 10 Juni 2011.
- [15] *Noise*, <http://id.wikipedia.org/wiki/Noise> diakses tanggal 10 Juni 2011.