

PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA BOWTIE ANTIPODAL 1,6 GHZ UNTUK GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

DESIGN AND REALIZATION OF 1.6 GHZ ANTIPODAL BOWTIE ANTENNA FOR GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

Dewi Septia Anzani¹, Heroe Wijanto², Dharu Arseno³

^{1,2,3} Universitas Telkom, Bandung

¹dewisanzani@student.telkomuniversity.ac.id, ²heroewijanto@telkomuniversity.ac.id,

³darseno@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan teknologi yang memanfaatkan gelombang radio untuk mendeteksi lokasi, kedalaman, dan bentuk objek yang terkubur di bawah permukaan bumi. Salah satu komponen penting pada sistem GPR yaitu antenna, yang terdiri atas antenna *transmitter* dan *receiver*. Antena yang dibutuhkan oleh sistem GPR memiliki spesifikasi *bandwidth* yang lebar, pola pancar *unidirectional*, dan *ringing level* yang rendah. Perancangan menggunakan antenna jenis bowtie antipodal dengan penambahan metode *edge cutting* dan *matching impedance* yang bekerja pada frekuensi 1,6 GHz. Nilai *bandwidth* yang dibutuhkan yaitu lebih besar 20% dari *bandwidth* fraksional antenna tersebut. Perancangan disimulasikan menggunakan *software* dan difabrikasi dengan menggunakan bahan substrat FR-4 Epoxy. Antena didesain untuk bekerja pada frekuensi 1,6 GHz. Hasil realisasi antenna memiliki hasil yang dapat memenuhi spesifikasi yang diinginkan yaitu memiliki nilai *bandwidth* sebesar 540 MHz pada rentang 1,32 GHz – 1,86 GHz, nilai *returnloss* -16,38 dB dan VSWR 1,35 pada frekuensi 1,6 GHz dan pola radiasi *bidirectional*.

Kata Kunci: Antena Bowtie, Antipodal, Edge Cutting, Ground Penetrating Radar (GPR), Matching Impedance.

Abstract

Ground Penetrating Radar (GPR) is a technology that uses radio waves to detect the location, depth, and shape of objects buried beneath the earth's surface. One of the important components in the GPR system is the antenna, which consists of a transmitter and receiver antenna. The antennas needed by the GPR system have wide bandwidth specifications, unidirectional transmit patterns, and low ringing levels. The design uses an antipodal bowtie antenna with the addition of edge cutting and matching impedance methods that work at a frequency of 1.6 GHz. The required bandwidth value is 20% greater than the fractional bandwidth of the antenna. The design is simulated using software and fabricated using FR-4 Epoxy as a substrate material. Based on the simulation results, the designed antenna has a bandwidth value of 843.9 MHz (1.354 GHz - 2.1979 GHz), the return loss value is -11.137 dB, and the VSWR is 1.767 at a frequency of 1.6 GHz with a bidirectional radiation pattern, and obtained ringing level value is -31.07 dB. The antenna measurement results have a smaller bandwidth value than the simulation, which is 540 MHz (1.32 GHz – 1.86 GHz), the return loss value is -16.38 dB and VSWR 1.3576 at 1.6 GHz frequency and radiation pattern. bidirectional. The results of the antenna design are in accordance with the antenna specifications on the GPR system.

Kata Kunci: Antipodal, Bowtie Antenna, Edge Cutting, Ground Penetrating Radar (GPR), Matching Impedance.

1. Pendahuluan

Radio detection and ranging (Radar) merupakan salah satu kemajuan teknologi yang sudah banyak diterapkan secara luas dalam pekerjaan teknik. Radar ialah salah satu metode yang efektif untuk mendeteksi posisi suatu objek. Sistem radar bekerja dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi suatu objek. Salah satu implementasi dari sistem radar adalah *Ground Penetrating Radar (GPR)*. GPR merupakan suatu sistem yang dapat memudahkan

pekerjaan dalam mendeteksi objek yang terkubur di bawah permukaan tanah, terowongan tersembunyi, pipa, kabel, dan ranjau darat [1]. GPR bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik melalui antena *transmitter* serta menembusnya ke permukaan tanah. Kemudian gelombang radio / sinyal yang dipancarkan dan dipantulkan dari objek akan ditangkap oleh sistem GPR, sehingga dapat diketahui lokasi dan jenis material dari objek tersebut [2]. Teknologi GPR juga dapat digunakan untuk mendeteksi material non-alami seperti aspal, beton, dan struktur jembatan. Teknologi GPR banyak digunakan pada bidang-bidang tertentu seperti bidang geofisika, teknik sipil, polisi, militer, program luar angkasa, dan arkeologi [3]. Pemilihan frekuensi pada sistem GPR menentukan kelas target yang dapat dideteksi, bergantung pada resolusi serta kedalaman penetrasi. Pita frekuensi yang lebih rendah atau lebih tinggi diperlukan pada sistem GPR, seperti frekuensi (0,01 – 2 GHz) dalam bidang arkeologi dan arsitektur, frekuensi (0,5 – 3 GHz) dalam bidang militer, dan frekuensi (1 – 10 GHz) dalam bidang medis [4].

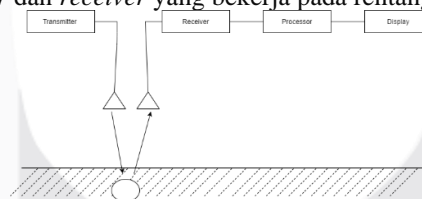
Salah satu komponen penting pada sistem GPR adalah antena, yang terdiri dari antena pemancar dan antena penerima. Antena yang diperlukan untuk sistem GPR harus memiliki *bandwidth* fraksional yang besar, pola radiasi *unidirectional*, dan *ringing level* yang rendah [3]. Umumnya antena yang digunakan pada sistem GPR adalah antena Vivaldi, antena TEM Horn dan antena Bowtie. Dibandingkan dengan antena *Ultrawide-band* (UWB) lainnya, antena bowtie mempunyai kelebihan yaitu lebih kecil dan lebih *compact* [5]. Menurut *Federal Communication Commission* (FCC), *bandwidth* yang dibutuhkan pada antena UWB harus lebih besar dari 20% frekuensi tengahnya [6]. Selain membutuhkan *bandwidth* yang lebar, antena pada sistem GPR juga memperhatikan nilai dari *ringing level*. *Ringling level* merupakan gelombang refleksi internal yang dapat menyebabkan efek *masking* yang mempengaruhi tingkat resolusi dan akurasi pendeteksian [7]. Karena berbagai permasalahan ketebalan tanah yang beragam dan gejala *late-time ringing* yang disebabkan oleh radiasi antena yang tidak maksimal, sistem GPR memerlukan resolusi yang tinggi. Nilai resolusi GPR dapat ditentukan oleh antena dan frekuensi yang digunakan. Frekuensi tinggi dapat memberikan resolusi yang lebih baik. Sistem GPR dengan frekuensi 1,6 GHz yang memiliki rentang kedalaman 50 cm dapat mendeteksi target logam dan non-logam di dinding [8].

Penelitian ini dirancang suatu antena bowtie antipodal dengan pemberian metode *edge cutting* dan *matching impedance* yang bekerja pada frekuensi 1,6 GHz untuk *Ground Penetrating Radar* (GPR). Desain antena ditargetkan memiliki desain yang sederhana dan sesuai dengan spesifikasi diharapkan. Untuk itu, pada penelitian ini akan digunakan beberapa penambahan metode *edge cutting* dan *matching impedance* guna melebarkan nilai *bandwidth* antena.

2. Dasar Teori

2.1 *Ground Penetrating Radar* (GPR)

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan salah satu implementasi dari sistem radar. GPR adalah suatu alat yang menggunakan gelombang radio untuk mendeteksi lokasi objek yang terkubur di bawah permukaan bumi atau terletak dalam struktur yang buram secara *visual* [10]. GPR terdiri atas antena *transmitter* dan *receiver* yang bekerja pada rentang frekuensi MHz hingga GHz.

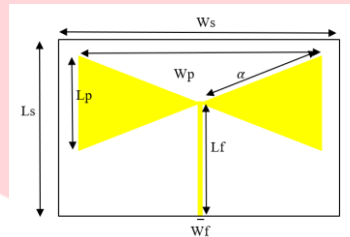


Gambar 1. Blok diagram GPR [9]

Pada Gambar 2.1, Blok diagram sistem GPR terdiri atas pengirim (*transmitter*) yaitu antena yang mengirim pulsa energi ke dalam tanah, penerima (*receiver*) yaitu antena yang menerima pulsa yang dipantulkan oleh objek dan terhubung ke pengolahan sinyal, *processor* untuk memproses atau mengolah data sinyal agar dapat terlihat pada *display*. Antena GPR tidak perlu bersentuhan dengan permukaan bumi, sehingga dapat melakukan pengukuran dengan cepat. Antena dapat dirancang untuk memiliki sifat lebar pita dan lebar berkas yang memadai, meskipun kinerja terbaik biasanya hanya diperoleh jika geometri rinci dan sifat tanah dipertimbangkan, terutama jika jarak antena ke permukaan yang kecil terlibat [2].

2.2 Antena Mikrostrip Bowtie

Antena mikrostrip memiliki berbagai macam bentuk *patch*, salah satunya berbentuk bowtie. Sistem GPR membutuhkan antena dengan *bandwidth* lebar dan *beam* yang sempit. Antena bowtie merupakan implementasi dari antena mikrostrip yang banyak digunakan pada GPR karena ukurannya yang lebih kecil dan *compact* dibandingkan dengan antena Vivaldi dan TEM Horn [8]. Antena bowtie adalah jenis antena dipole biconical atau bentuk planar dari antena biconical. Antena yang memiliki bentuk yang sederhana, berpita lebar dan mudah dibuat. Antena bowtie dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. Antena Bowtie

Adapun untuk menentukan panjang sisi patch antena bowtie (α) digunakan persamaan (2.1) sebagai berikut [14]:

$$\alpha = \frac{2c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

Untuk mencari nilai panjang *patch* (L_p) dan lebar *patch* (W_p) dapat menggunakan persamaan (2.2) dan (2.3) [14] dengan mencari nilai panjang dielektrik (α_{eff}) terlebih dahulu

$$\alpha_{eff} = \alpha + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

$$L_p = 2\alpha_{eff} \sin \theta \quad (2.3)$$

$$W_p = 2\alpha_{eff} \cos \theta \quad (2.4)$$

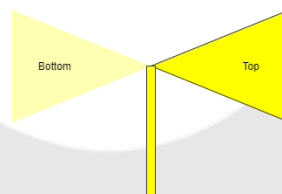
Selanjutnya, untuk menentukan nilai panjang substrat (L_s) dan lebar substrat (W_s) dapat menggunakan persamaan [14] :

$$W_s \geq 6h + W_p \quad (2.5)$$

$$L_s \geq \frac{1}{2}L_p + 3h + L_f \quad (2.6)$$

2.3 Struktur Antipodal

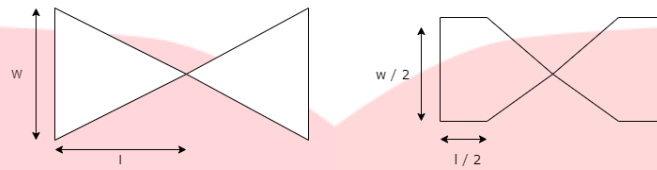
Struktur antena terbagi menjadi dua bagian yaitu coplanar dan antipodal. Bentuk coplanar merupakan bentuk awal dari antena mikrostrip bowtie. Kedua bidang radiasi berada di sisi yang sama dari bidang dielektrik [11]. Keterbatasan struktur coplanar terletak pada teknik pencatutan yang digunakan yaitu *microstrip-to-slotline* yang memiliki rugi-rugi radiasi tinggi sehingga dibutuhkan *stub* [12]. Oleh karena itu, dipilih struktur antipodal yang lebih mudah digunakan pada teknik pencatutan *microstrip line*. Selain dapat dengan mudah digunakan pada pencatutan *microstrip line*, struktur antipodal juga dapat mencapai nilai *bandwidth* yang lebih lebar dibandingkan dengan struktur coplanar [12]. Struktur antipodal adalah konfigurasi dua lengan *patch* bowtie yang berlawanan satu sama lain dan terletak di lapisan yang berbeda (tidak sejajar).



Gambar 3. Antena bowtie struktur antipodal

2.4 Edge Cutting

Edge Cutting atau pemotongan paralel pada tepi antena digunakan untuk meminimalkan dimensi geometri pada antena. Secara teoritis, pemotongan tepi pada antena akan menyebabkan refleksi arus pada tepi dan juga akan mengubah karakteristik impedansi konstan dari antena. Pemotongan tepi pada antena dapat memperlebar nilai *bandwidth* dan menggeser frekuensi pusat.



Gambar 4. Antena bowtie (a) Tanpa edge cutting (b) Dengan edge cutting

Nilai w dapat dihitung menggunakan persamaan (2.4), sedangkan untuk menghitung nilai l , perlu dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus pada persamaan sebagai berikut :

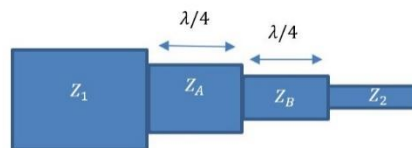
$$l = \frac{1}{2} \lambda_0 \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.7)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{4} \frac{\epsilon_r - 1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{a}}} \quad (2.9)$$

2.5 Matching Impedance

Penggunaan *matching impedance* merupakan salah satu langkah untuk mencapai parameter kinerja antenna yang optimal seperti *return loss*, efisiensi, dan gain [13]. *Matching impedance* dilakukan untuk menyeimbangkan dua perbedaan impedansi antara sumber dan beban, sehingga dapat meminimalkan gelombang pantulan yang akan merusak sistem [13]. Saluran transmisi pada antenna bisa dikatakan *match* ataupun cocok apabila tidak terdapat gelombang yang kembali (terpantul) antara wilayah saluran beban atau dapat dikatakan $Z_o = Z_L$ dengan Z_o adalah impedansi karakteristik = 50Ω dan Z_L adalah impedansi beban. Salah satu teknik *matching impedance* yang cocok digunakan pada pita lebar yaitu *multi-section quarter wave transformer*.



Gambar 5. Two-Section Quarter Wave Transformer

Dengan nilai Z_1 ialah impedansi input dan Z_2 ialah impedansi beban antenna. Maka untuk menghitung nilai dari karakteristik impedansi dari transformator $\lambda/4$ two-section adalah sebagai berikut :

$$Z_A = Z_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.10)$$

$$Z_B = Z_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (2.11)$$

3. Desain dan Simulasi Antena

Penelitian ini dirancang antenna bowtie untuk *Ground Penetrating Radar* (GPR) menggunakan *software* simulator *CST Studio* 2019. Antena dirancang menggunakan substrat FR-4 Epoxy dengan konstanta dielektrik 4,3 dan tebal 1,6 mm. Spesifikasi yang ditentukan dapat dilihat pada Tabel 1. Antena bowtie antipodal dengan penambahan *edge cutting* dan *matching impedance* terlihat pada Gambar 6.

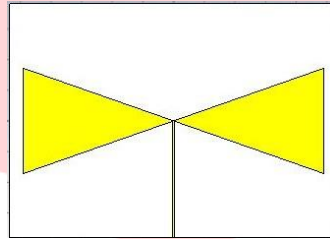
Tabel I. Spesifikasi Antena

Parameter	Spesifikasi
Jenis Antena	Antena Bowtie
Frekuensi Kerja	1,6 GHz
Bandwidth	≥ 500 MHz
Returnloss	≤ -10 dB
VSWR	≤ 2
Pola Radiasi	Unidireksional
Ringing Level	≤ -30 dB

<i>Gain</i>	$\geq 2 \text{ dBi}$
-------------	----------------------

3.1 Desain Awal Antena

Perancangan antena dimulai dengan perhitungan dimensi antena berdasarkan persamaan matematis. Penelitian ini menggunakan antena jenis bowtie dengan spesifikasi yang telah ditentukan seperti pada Tabel I. Desain antena menggunakan *software* seperti yang terlihat pada Gambar 1.

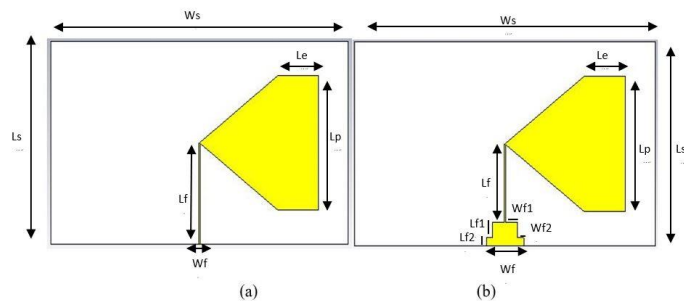


Gambar 6. Desain Awal Antena Bowtie

Hasil yang didapatkan dari simulasi dapat dilihat pada Gambar 2 hingga 4. Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan hasil optimasi nilai parameter *returnloss* dan VSWR antena. Nilai *returnloss* yang dihasilkan sebesar -12,205 dB, nilai VSWR yang dihasilkan sebesar 1,65 dengan nilai *bandwidth* yang dihasilkan sebesar 26 MHz. Nilai *bandwidth* yang dihasilkan masih belum memenuhi spesifikasi yang ditentukan sama halnya dengan nilai *ringing level* yang masih di atas -30 dB. Berdasarkan hasil yang didapatkan, dilakukan penambahan beberapa metode seperti struktur antipodal, *edge cutting*, dan *matching impedance transformator* $\lambda/4$ sehingga dapat memenuhi spesifikasi yang ditentukan.

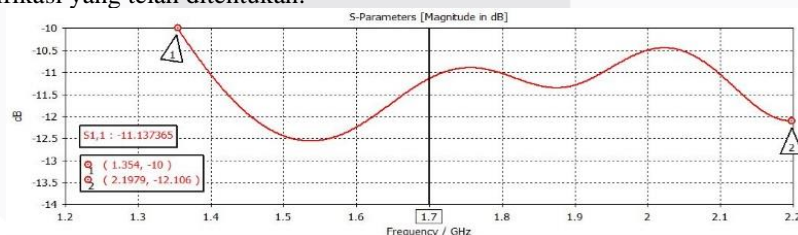
3.3 Hasil Simulasi

Hasil perancangan antena bowtie terlihat pada Gambar 6. Antena dirancang menggunakan beberapa metode seperti struktur antipodal, *edge cutting*, dan *matching impedance transformator* $\lambda/4$.

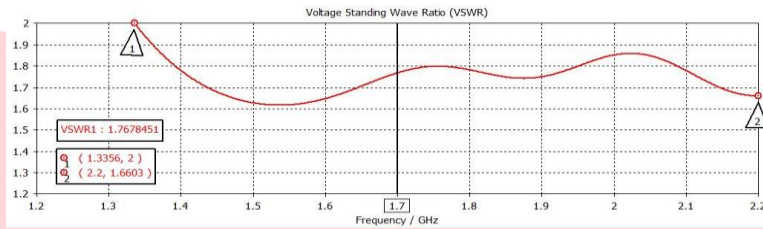


Gambar 7. Desain Antena Bowtie: (a) Sisi depan (b) Sisi belakang

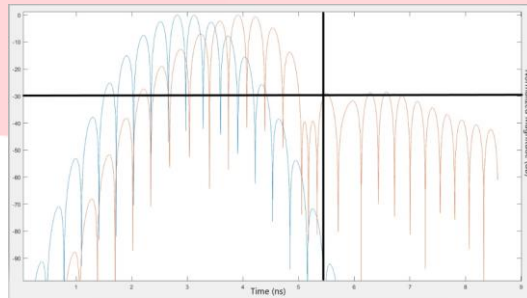
Hasil simulasi yang diperoleh dari penggunaan beberapa metode dapat dilihat pada Gambar 7, 8, dan 9. Hasil dari parameter *returnloss* didapatkan sebesar -11,137 dB dengan nilai *bandwidth* yang dihasilkan yaitu 843,9 MHz pada rentang frekuensi (2,1979 GHz-1,354 GHz). Nilai VSWR yang dihasilkan sebesar 1,767 dan nilai *ringing level* sebesar -31,07 dB. Nilai tersebut sudah memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan.



Gambar 7. Returnloss Antena Bowtie



Gambar 8. VSWR Antena Bowtie



Gambar 9. Ringing Level Antena Bowtie

Tabel II Dimensi Akhir Antena

Dimensi Antena Bowtie	Parameter	Nilai (mm)
Panjang <i>patch</i>	L_p	114,25
Lebar <i>patch</i>	W_p	232
Panjang substrat	L_s	172
Lebar substrat	W_s	290
Lebar catuan	W_f	2
Panjang saluran transmisi	L_f	81
Lebar catuan 1	W_{f1}	7
Lebar catuan 2	W_{f2}	12,75
Panjang saluran transmisi 1	L_{f1}	36
Panjang saluran transmisi 2	L_{f2}	24
Panjang <i>edge cutting</i>	L_e	39,39

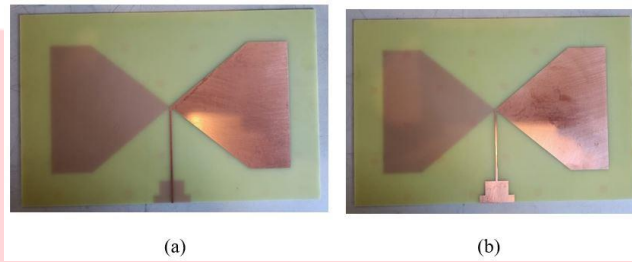
Penggunaan beberapa metode berguna untuk memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan. Berdasarkan Tabel III, penggunaan jenis metode berbanding lurus dengan *bandwidth* yang dihasilkan. Dengan bertambahnya metode yang digunakan, nilai *bandwidth* yang dihasilkan semakin melebar. Sama halnya dengan *ringing level* yang semakin menurun dengan bertambahnya metode yang digunakan. Nilai *returnloss* dan nilai VSWR relatif berbeda-beda tetapi hal tersebut tidak berpengaruh jika nilai masih memenuhi spesifikasi.

Tabel III. Hasil perbandingan parameter antena

	Inisiasi Awal Antena	Struktur Antipodal	Edge Cutting	Matching Impedance
<i>Returnloss</i> (dB)	-12,205	-21,348	-13,757	-11,137
VSWR	1,65	1,18	1,516	1,767
<i>Bandwidth</i> (MHz)	26	514,6	563,4	843,9
<i>Ringing Level</i> (dB)	-1,67	-11,24	-19,57	-31,07

3.2. Realisasi Antena

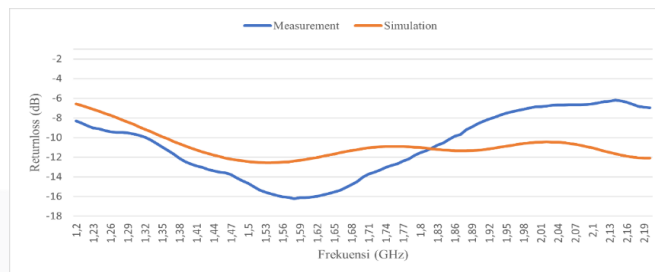
Setelah proses simulasi antena pada *software* telah memenuhi spesifikasi, maka selanjutnya melakukan fabrikasi antena berdasarkan hasil dari simulasi. Hasil realisasi antena dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 Realisasi antenna

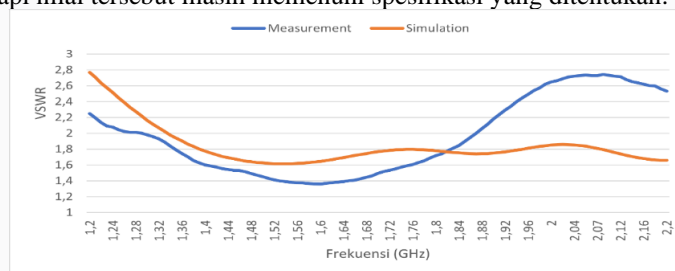
3.3. Hasil Pengukuran

Pengukuran dilakukan untuk membandingkan hasil pada simulasi berbanding lurus dengan hasil realisasi antenna. Parameter yang dilakukan pengukuran yaitu returnloss, VSWR, bandwidth, pola radiasi, dan gain antenna. Hasil yang didapatkan dari nilai returnloss yaitu sebesar -16,38 dB seperti yang terlihat pada Gambar 11. Nilai returnloss mengalami penurunan dari -11,137 dB menjadi -16,38 dB. Penurunan nilai tersebut dapat disebabkan oleh sifat bahan dan proses fabrikasi yang tidak ideal.



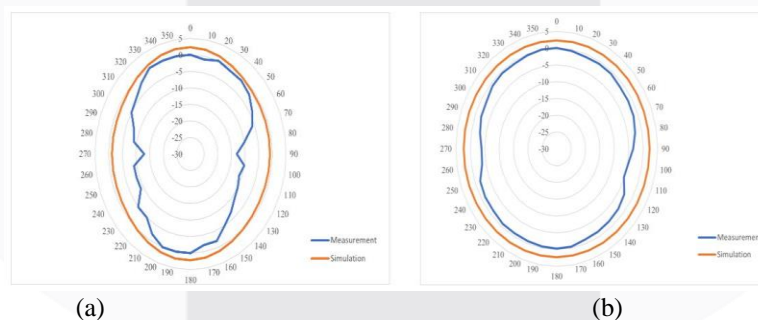
Gambar 11. Perbandingan nilai returnloss hasil simulasi dan pengukuran

Hasil nilai bandwidth pada pengukuran mengalami penyempitan dibandingkan dengan hasil simulasi. Penyempitan nilai bandwidth tersebut disebabkan oleh nilai returnloss yang menurun. Nilai bandwidth yang diperoleh sebesar 540 MHz atau sebesar 33,75% dari bandwidth fraksionalnya. Walaupun nilai bandwidth yang dihasilkan pada pengukuran mengalami penyempitan, tetapi nilai tersebut masih memenuhi spesifikasi yang ditentukan.



Gambar 12. Perbandingan VSWR hasil simulasi dan pengukuran

Hasil pengukuran pada nilai VSWR dapat dilihat pada Gambar 12. Nilai yang diperoleh pada hasil pengukuran memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil simulasi. Nilai yang dihasilkan sebesar 1,3576 pada frekuensi 1,6 GHz.



Gambar 13. Perbandingan Pola Radiasi pada arah a) Azimuth b) Elevasi

4. Kesimpulan

Antena bowtie antipodal pada frekuensi 1,6 GHz untuk GPR telah dirancang. Hasil simulasi pada parameter antenna menunjukkan bahwa antenna telah memenuhi spesifikasi. Ditunjukkan bahwa $S_{11} < -10$ dB memiliki bandwidth 843,9 MHz atau 52,74% dari bandwidth fraksionalnya. Nilai VSWR < 2 dan nilai *ringing level* < -30 dB. Sedangkan hasil pengukuran antenna realisasi, parameter $S_{11} < -10$ dB dengan nilai bandwidth yang dihasilkan sebesar 540 MHz atau 33,75% dari bandwidth fraksionalnya, nilai VSWR < 2 . Pola radiasi yang dihasilkan merupakan pola radiasi bidirectional atau arah pancaran antenna ke dua arah yang berbeda yang berada pada sudut 0° dan 180° . Nilai yang dihasilkan pada pengukuran mengalami penyempitan pada bandwidth antenna karena kondisi peralatan dan ruangan yang kurang ideal.

Referensi:

- [1] M. N. A. Karim, M. F. A. Malek, M. F. Jamlos, L. Y. Seng, and N. Saudin, "Design of Ground Penetrating Radar antenna for buried object detection," *RFM 2013 - 2013 IEEE Int. RF Microw. Conf. Proc.*, pp. 253–257, 2013, doi: 10.1109/RFM.2013.6757260.
- [2] D. J. Daniel, *Surface Penetrating Radar*. The Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [3] Harry M. Jol - *Ground Penetrating Radar Theory and Applications-Elsevier Science (2009).pdf*.
- [4] F. Congedo, G. Monti, and L. Tarricone, "Modified bowtie antenna for GPR applications," *Proc. 13th International Conf. Gr. Penetrating Radar, GPR 2010*, vol. 11, pp. 6–10, 2010, doi: 10.1109/ICGPR.2010.5550127.
- [5] Commission Federal Communications (FCC), "First Report and Order in The Matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultrawideband Transmission System," *ET Docket 98-153*, vol. 20554, no. Washington, D.C., 2002.
- [6] I. Geophysical Survey System, "Product catalogue-antennas brochure," <http://www.geophysical.com/>.
- [7] R. V De Jongh, A. G. Yarovoy, L. P. Ligthart, I. V Kaploun, and A. D. Schukin, "Design and analysis of new GPR antenna concepts," *Proceedings, Seventh International Conf. Ground-Penetrating Radar*, no. 1, pp. 81–86, 1998.
- [8] S. KARAMZADEH, O. F. KILIÇ, A. S. HEPBİÇER, and F. DEMİRBAŞ, "Bow Tie Antenna Design for GPR Applications," *Int. J. Electron. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 1187–1194, 2016, doi: 10.17932/iau.ijemme.m.21460604.2016.6/2.1187-1194.
- [9] M. A. Saputra, H. Wijanto, and Y. Wahyu, "Antena Vivaldi Antipodal Sirkular Ultra Wide-Band (Uwb) Untuk Radar Tembus Tembok," *Semin. Nas. Sains dan Teknol. 2018*, pp. 1–10, 2018, [Online]. Available: jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek.
- [10] F. Oktafiani, S. Sulistyaningsih, and Y. Wijayanto, "Sistem Ground Penetrating Radar Untuk Mendeteksi Benda-benda Di Bawah Permukaan Tanah," *INKOM J. Informatics, Control Syst. Comput.*, vol. 1, no. 2, pp. 53–57, 2007.
- [11] N. Ardelina, "Untuk Aplikasi Ground Penetrating Radar Ultra Wideband (Gpr-Uwb) Design of Vivaldi Array Antenna for Ground Penetrating Radar Ultra," 2016.
- [12] J. Bai, S. Shi, D. W. Prather, and S. Member, "<Modified Compact Antipodal Vivaldi Antenna.pdf>," vol. 59, no. 4, pp. 1051–1057, 2011.
- [13] S. Sharma, C. C. Tripathi, and R. Rishi, "Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 28, pp. 1–16, 2017, doi: 10.17485/ijst/2017/v10i28/97642.
- [14] M. K. A. Rahim, M. Z. A. Abdul Aziz, and C. S. Goh, "Bow-tie microstrip antenna design," *2005 13th IEEE Int. Conf. Networks jointly held with 2005 7th IEEE Malaysia Int. Conf. Commun. Proc.*, vol. 1, pp. 17–20, 2005, doi: 10.1109/ICON.2005.1635425.