

Pengembangan Antena Bowtie 2,1 GHz Terintegrasi Artificial Magnetic Conductor (AMC) untuk Aplikasi Antena Transmitter pada Sistem Ground Penetrating Radar (GPR)

Levy Olivia Nur, Raeida Widyandanda, dan Heroe Wijanto
Fakultas Teknik Elektro, Telkom University
Jalan Telekomunikasi No. 1, Terusan Buah Batu, Bandung, Indonesia, 40257
e-mail: levyolivia@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Penelitian ini mempresentasikan pengembangan desain sistem antena *bowtie* sebagai *transmitter* pada sistem *Ground Penetrating Radar* (GPR). Reflektor *Artificial Magnetic Conductor* (AMC) diintegrasikan pada sistem antena sebagai *ground plane* untuk mendapatkan *gain* yang tinggi, meningkatkan *bandwidth* dan menghasilkan antena yang *low-profile*. Antena dirancang bekerja pada frekuensi tengah 2,1 GHz dengan rentang 1,6–2,6 GHz dan memiliki karakteristik *ultra-wideband* (UWB) dengan nilai *fractional bandwidth* $\geq 25\%$. Selain itu, nilai *late-time ringing* juga harus dikurangi hingga -30 dB untuk mencegah efek masking terhadap objek yang dideteksi. Pemodelan dan simulasi antena dilakukan untuk mendapatkan desain *prototipe* yang optimum. Realisasi antena *bowtie* dilakukan menggunakan RT Duroid 5880 sebagai substrat dengan konstanta dielektrik (ϵ_r)=2,2 dan ketebalan (h)=1,57 mm. Reflektor AMC difabrikasi dengan substrat FR-4 Epoxy dengan konstanta dielektrik (ϵ_r)=4,4 dan ketebalan (h)=1,6 mm. Hasil realisasi antena menunjukkan bahwa antena memiliki *bandwidth*=510 MHz, *return loss* = -15,17 dB dan *VSWR*=1,15. Pola radiasi antena *bowtie* terintegrasi AMC menghasilkan pola unidireksional dengan *gain* = 4,2 dB. Akan tetapi, nilai *ringing level* menjadi tinggi sebesar -19,18 dB. Pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk mendapatkan nilai *ringing level* yang memenuhi spesifikasi sistem antena GPR.

Kata kunci: *ground penetrating radar (gpr), antena bowtie, artificial magnetic conductor (amc), ultrawide-band (uwb)*

Abstract—This study presented the development of the bowtie antenna system design as the transmitter in the Ground Penetrating Radar (GPR) system. The Artificial Magnetic Conductor (AMC) reflector was integrated into the antenna system as a ground plane to obtain a high gain, increase bandwidth and produce a low-profile antenna. The antenna is designed to work at a center frequency of 2.1 GHz with a range of 1.6 - 2.6 GHz and has ultra-wideband (UWB) characteristics with a fractional bandwidth of $\geq 25\%$. In addition, the value of late-time ringing must also be reduced to -30 dB to prevent masking effects on the detected object. Antenna modeling and simulation was done to obtain the optimum prototype design. Bowtie antenna realization was carried out using RT Duroid 5880 as a substrate with dielectric constant (ϵ_r) = 2.2 and thickness (h) = 1.57 mm. The AMC reflector was fabricated with FR-4 Epoxy substrate with a dielectric constant (ϵ_r) = 4.4 and thickness (h) = 1.6 mm. The antenna realization results show that the antenna has bandwidth = 510 MHz, return loss = -15.17 dB and VSWR = 1.15. The AMC integrated bowtie antenna radiation pattern produces a unidirectional pattern with gain = 4.2 dB. However, the ringing level becomes high by -19.18 dB. Further development is needed to achieve ringing level values that meet the GPR antenna system specifications.

Keywords: *ground penetrating radar (gpr), bowtie antenna, artificial magnetic conductor (amc), ultrawide-band (uwb)*

Copyright © 2020 Jurnal Rekayasa Elektroika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Radio Detection and Ranging (Radar) adalah suatu sistem yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi letak suatu objek. Sistem radar bekerja berdasarkan karakteristik gelombang elektromagnetik yang dipancarkan dan diterima kembali oleh sistem. *Ground Penetrating Radar* (GPR) atau *Surface Penetrating*

Radar (SPR) merupakan salah satu teknologi yang memanfaatkan sistem radar untuk mendeteksi letak suatu objek yang berada jauh di bawah permukaan tanah. GPR dapat diaplikasikan pada berbagai bidang seperti bidang lingkungan, arkeologi, sipil, militer, dan sebagainya [1], [2].

Sistem GPR memiliki karakteristik antena dengan *bandwidth* yang lebar dan lebar pulsa yang sempit serta

nilai *gain* dan direktivitas yang tinggi. Selain itu, sistem GPR juga memperhatikan nilai *late-time ringing* yang dapat mempengaruhi tingkat resolusi kerja antenna. Antena *ultrawide-band* (UWB) dengan frekuensi antara 10 MHz – 10 GHz merupakan antenna yang memenuhi karakteristik sistem GPR [3], [4].

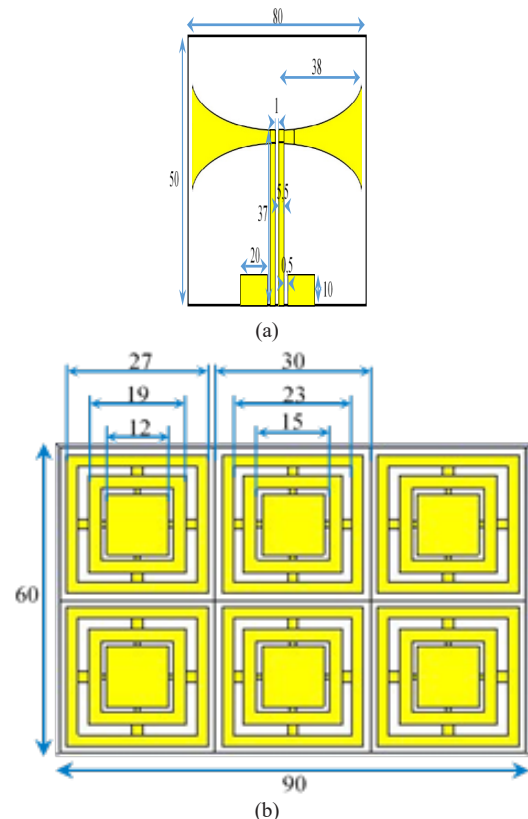
Terdapat beberapa jenis antenna UWB yang dapat digunakan pada sistem GPR seperti *bowtie*, *Transverse Electromagnetic* (TEM) *horn* dan Vivaldi [5]. Antena *bowtie* memiliki keunggulan yaitu desain yang *compact* dan ringan dibandingkan dengan antenna yang lainnya [6]. Namun, *gain* dan direktivitas antenna *bowtie* tergolong relatif kecil [4].

Artificial Magnetic Conductor (AMC) merupakan bahan komposit yang sifatnya mirip *Perfect Magnetic Conductor* (PMC). Karakteristik dari PMC adalah dapat memantulkan gelombang elektromagnetik yang datang tanpa mengubah fase pantulannya serta mengurangi interferensi antara gelombang permukaan dengan radiasi utama dari antenna. AMC memberikan perbaikan untuk sistem antenna dan memungkinkan berbagai aplikasi yang potensial pada antenna, *ground plane*, resonator, reflektor, absorber, dan komponen antenna lainnya [7].

Beberapa penelitian sebelumnya telah melakukan peningkatan kinerja antenna *bowtie* pada sistem GPR dengan metode pelebaran nilai *bandwidth* [8], analisis nilai *late-time ringing* [9] dan peningkatan *gain* dengan integrasi fraktal *Artificial Magnetic Conductor* (AMC) [10]. Pada penelitian ini, simulasi dan realisasi antenna *bowtie* sebagai *transmitter* pada sistem GPR dilakukan dengan integrasi AMC sebagai *ground plane*. Frekuensi kerja yang digunakan, 1,6GHz–2,6GHz berdasarkan frekuensi kerja yang direkomendasikan *Geophysical Survey System, Inc.* (GSSI) Amerika. Integrasi AMC diharapkan dapat memperlebar *bandwidth* dan menghasilkan *late-time ringing* rendah serta memberikan *gain* yang tinggi.

II. METODE

Pada penelitian ini, antenna *bowtie* dirancang sebagai antenna *transmitter* pada sistem GPR dengan penambahan AMC sebagai komponen reflektor. Jenis *patch* dengan bentuk *bowtie* dipilih karena memiliki desain yang relatif kecil dan ringan dibandingkan dengan antenna jenis lain seperti TEM Horn dan Vivaldi [6]. Antenna difabrikasi menggunakan material tembaga dengan ketebalan (t) = 0,035 mm yang diterapkan di atas substrat RT-Duroid 5880 dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) = 2,2 dan ketebalan (h) = 1,57 mm. Jenis catuan yang digunakan adalah *microstrip feedline* yang diterapkan bersamaan pada proses fabrikasi. Antenna didesain untuk memiliki spesifikasi kerja seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Elemen parasitik ditambahkan pada rancangan antenna *bowtie* untuk memperlebar *bandwidth* yang dihasilkan [11]. Sementara itu, reflektor AMC difabrikasi pada substrat FR-4 Epoxy dengan konstanta dielektrik, $\epsilon_r = 4,4$ dan ketebalan, $h = 1,5$ mm. Reflektor AMC didesain dengan penambahan *slotted ring* dan dirancang memiliki spesifikasi rentang frekuensi kerja



Gambar 1. Desain model simulasi: (a) antenna *bowtie*; (b) reflektor AMC (skala dalam mm).

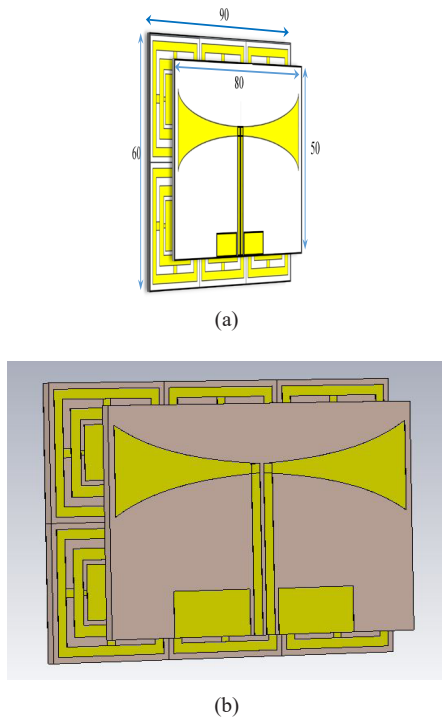
dan frekuensi tengah sama dengan antenna *bowtie* dan menghasilkan fase refleksi mendekati 0° .

Proses desain dan simulasi meliputi pembuatan model antenna melalui perhitungan dimensi antenna secara matematis dan dilanjutkan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak Simulator 3D CST Studio untuk proses optimasi model sebelum difabrikasi. Serangkaian simulasi dilakukan untuk mendapatkan spesifikasi antenna yang optimum. Gambar 1 (a) dan (b) masing-masing menunjukkan model antenna *bowtie* dan reflektor AMC dengan hasil simulasi yang optimum.

Pemodelan dan simulasi juga dilakukan untuk menentukan jarak optimum antara antenna *bowtie* dan reflektor AMC. Integrasi antenna *bowtie* dengan reflektor AMC ditunjukkan pada Gambar 2. Perbandingan hasil simulasi penentuan jarak model antenna *bowtie* terintegrasi reflektor AMC ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi antenna *bowtie* untuk aplikasi GPR

Parameter	Nilai
Frekuensi kerja	1,6 – 2,6 GHz
Frekuensi tengah	2,1 GHz
Bandwidth (BW)	Ultra-wideband (500 MHz)
Return loss	10 dB
VSWR	2
Ringing level	30 dB
Gain	3 dB
Pola radiasi	Unidireksional



Gambar 2. Desain model simulasi antena bowtie terintegrasi reflektor AMC (skala dalam mm); (a) plain view; (b) realistic view

Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat bahwa jarak antena bowtie dengan reflektor AMC yang menghasilkan spesifikasi memenuhi kriteria sistem GPR adalah pada jarak sejauh 30 mm, dimana pada jarak tersebut didapatkan *return loss* -15,15 dB dengan *bandwidth* 592,6 MHz. Selain itu, *gain* yang dihasilkan sebesar 4,351 dB dengan pola radiasi unidireksional.

Pengukuran *return loss*, *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR) dan *bandwidth* dilakukan dengan menggunakan T5280A *Vector Network Analyzer* (VNA) dengan spesifikasi rentang frekuensi 300 KHz–8 GHz di Laboratorium Elektromagnetika Telekomunikasi, Universitas Telkom. Sementara itu, pengukuran parameter pola radiasi dan *gain* dilakukan menggunakan Hewlett Packard 8593A *Spectrum Analyzer* dengan spesifikasi rentang frekuensi 9 KHz–22 GHz di *Anechoic Chamber* PT. Radar Telekomunikasi Indonesia. Pengujian dan

Tabel 2. Simulasi jarak optimum antena bowtie – reflektor AMC.

Jarak (mm)	S11 (dB)	BW (MHz)	f (GHz)	Gain (dB)	Pola Radiasi
5	-9,92	196,8	2,10 – 2,30	4,078	Unidireksional
10	-10,58	201,5	2,08 – 2,27	4,594	Unidireksional
15	-11,47	285,3	1,90 – 2,20	4,796	Unidireksional
20	-12,4	402,5	1,80 – 2,26	4,796	Unidireksional
25	-13,39	475,5	1,78 – 2,25	4,642	Unidireksional
30	-15,15	592,6	1,74 – 2,32	4,351	Unidireksional



(a)



(b)

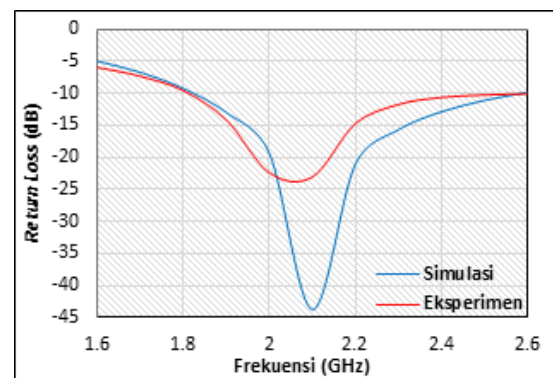
Gambar 3. Prototipe hasil fabrikasi: (a) antena bowtie; (b)reflektor AMC.

pengukuran dilakukan pada rentang frekuensi kerja 1,6–2,6 GHz dan frekuensi tengah 2,1 GHz.

Fabrikasi antena bowtie dan reflektor AMC dilakukan berdasarkan model simulasi yang telah dibuat dengan tujuan spesifikasi optimum antena untuk sistem GPR meliputi beberapa parameter seperti nilai VSWR, *gain*, *bandwidth*, dan pola radiasi. Prototipe antena bowtie dan reflektor AMC dapat dilihat pada Gambar 3. (a) dan (b). Konektor *SubMiniature* versi A (SMA) digunakan sebagai *Female Clamp Panel* sebagai catuan daya ke antenna.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4 menunjukkan perbandingan pengukuran *return loss* antena bowtie tanpa reflektor AMC dari hasil simulasi dan realisasi eksperimen. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa kurva pengukuran *return loss* hasil simulasi berbeda dengan hasil pengukuran eksperimen. Data perbandingan pengukuran *return loss* disajikan pada Tabel 3. Nilai *return loss* hasil pengukuran eksperimen lebih besar dari hasil simulasi, diduga disebabkan oleh



Gambar 4. Grafik perbandingan pengukuran return loss antena bowtie tanpa reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen.

Tabel 3. Data perbandingan pengukuran return loss dan bandwidth antenna bowtie tanpa reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen.

Hasil	Return Loss (dB)	Bandwidth (MHz)	Kriteria UWB
Simulasi	-43,75	764	Memenuhi
Eksperimen	-23,04	594	Memenuhi

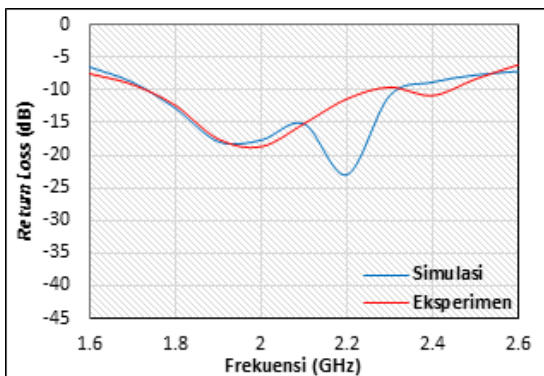
dua faktor, yaitu akibat gangguan koneksi antara antena-konektor-VNA dan gangguan interferensi gelombang elektromagnetik. Meskipun demikian, nilai *return loss* hasil pengukuran eksperimental masih memenuhi kriteria spesifikasi antena untuk aplikasi GPR.

Pada Tabel 3 juga dapat diamati perbedaan nilai *bandwidth* hasil simulasi dengan hasil eksperimen. *Bandwidth* hasil eksperimen lebih sempit dibandingkan hasil simulasi, hal tersebut disebabkan oleh nilai *return loss* yang lebih tinggi pada hasil pengukuran eksperimental. Nilai *bandwidth* prototipe antena *bowtie* masih memenuhi kriteria spesifikasi antena GPR yang diinginkan yaitu 500 MHz.

Return loss merupakan perbandingan dari daya yang dipantulkan kembali ke antena dengan daya yang ditransmisikan oleh antena. Sedangkan *bandwidth* adalah rentang frekuensi dimana antena tersebut dapat bekerja yang dibatasi oleh dua titik frekuensi dengan nilai *return loss* tertentu (≤ -10 dB atau ≤ -15 dB). Pengukuran nilai *return loss* dan *bandwidth* dilakukan untuk mengetahui daerah kerja antena GPR.

Gambar 5 menunjukkan grafik perbandingan hasil pengukuran *return loss* antena *bowtie* terintegrasi reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen. Pada frekuensi tengah, nilai *return loss* hasil pengukuran eksperimental hanya berbeda sedikit dari hasil simulasi (~ 0,02 dB). Sementara itu, nilai *bandwidth* hasil pengukuran eksperimental lebih sempit dibandingkan dengan hasil simulasi. Hal tersebut disebabkan oleh proses realisasi eksperimental tidak seakurat dimensi model pada proses simulasi dan kondisi pengukuran eksperimental tidak seideal kondisi simulasi. Data perbandingan pengukuran *return loss* antena *bowtie* terintegrasi reflektor AMC disajikan pada Tabel 4.

VSWR merupakan perbandingan antara tegangan maksimum dengan tegangan minimum pada suatu gelombang berdiri akibat terjadinya pantulan gelombang



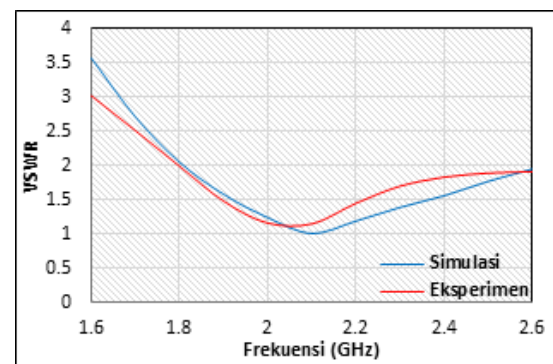
Gambar 5. Grafik perbandingan pengukuran return loss antena bowtie terintegrasi reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen

Tabel 4. Data perbandingan pengukuran return loss dan bandwidth antenna bowtie terintegrasi reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen.

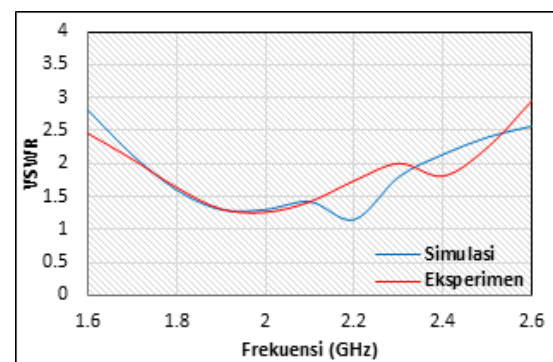
Hasil	Return Loss (dB)	Bandwidth (MHz)	Kriteria UWB
Simulasi	-15,15	592	Memenuhi
Eksperimen	-15,17	510	Memenuhi

antara saluran transmisi dengan antena. Nilai VSWR memengaruhi transfer daya efektif dari sumber ke antena. Gambar 6 menunjukkan grafik perbandingan pengukuran nilai VSWR antena *bowtie* tanpa reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen. Nilai VSWR hasil simulasi dan eksperimen masing-masing sebesar 1,013 dan 1,15. Perbedaan yang terjadi diduga disebabkan oleh faktor eksperimen. Gambar 7 menunjukkan grafik perbandingan pengukuran nilai VSWR antena *bowtie* terintegrasi reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen. Nilai VSWR hasil simulasi dan eksperimen masing-masing sebesar 1,42 dan 1,424.

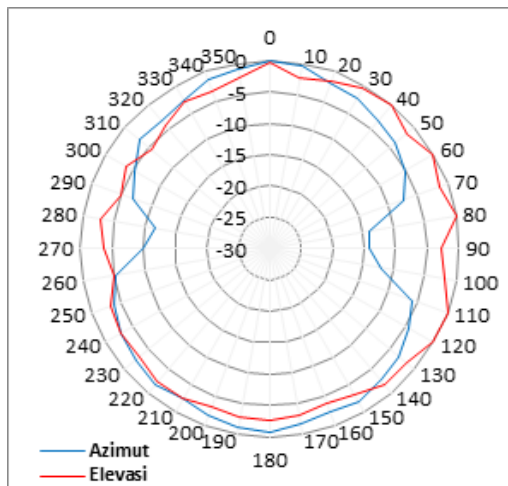
Pola radiasi adalah arah pancar antena dalam memancarkan daya ke arah tertentu. Pola radiasi diukur dengan arah azimut dan elevasi. Adapun penggambaran dari pola radiasi sebagai suatu intensitas pancaran antena sebagai fungsi dari parameter koordinat bola (θ, φ). Pengukuran antena dilakukan pada bidang azimut yaitu dengan arah bidang horizontal (φ) dan bidang elevasi dengan arah vertikal (θ). Data pengukuran diambil dengan melihat nilai S-Parameter (S_{21}) sebagai suatu domain waktu. Kemudian hasil tersebut digambarkan sesuai



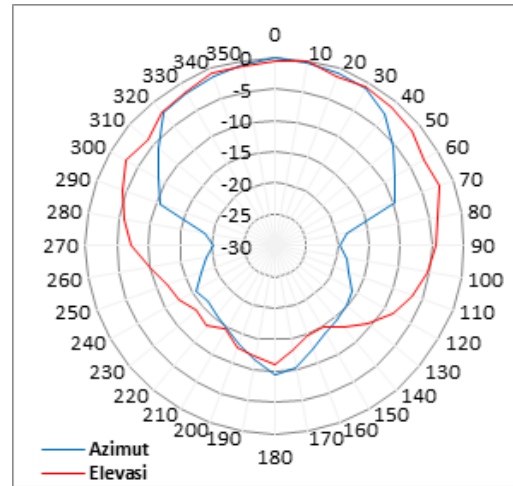
Gambar 6. Grafik perbandingan pengukuran nilai VSWR antena bowtie tanpa reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen.



Gambar 7. Grafik perbandingan pengukuran nilai VSWR antena bowtie terintegrasi reflektor AMC hasil simulasi dan eksperimen



Gambar 8. Perbandingan pola radiasi antena bowtie tanpa reflektor AMC.



Gambar 9. Perbandingan pola radiasi antena bowtie terintegrasi reflektor AMC.

Tabel 5. Perbandingan spesifikasi antara antena hasil simulasi dan hasil eksperimen (fabrikasi)

	Spesifikasi	Simulasi Antena Bowtie	Eksperimen Antena Bowtie	Simulasi Antena Bowtie dengan AMC	Eksperimen Antena Bowtie dengan AMC
Return Loss	≤ 10 dB	-43,25 dB	-23,04 dB	-15,15 dB	-15,17 dB
BW	≥ 500 MHz	763,8 MHz	594 MHz	592,6 MHz	510 MHz
Ringin Level	≤ 30 dB	-32,35 dB	-	-19,18 dB	-
Pola Radiasi	Unidireksional	Bidireksional	Unidireksional	Unidireksional	Unidireksional
Gain	≥ 3 dB	1,74 dB	1,6 dB	4,351 dB	4,2 dB

dengan arah sudut pengambilan yaitu arah elevasi dan azimut.

Berdasarkan Gambar 8 dapat diamati bahwa pada arah horizontal pola radiasi antena *bowtie* tanpa reflektor AMC hasil simulasi pancaran daya maksimum pada sudut 0°. Sehingga, posisi antena dalam mentransfer daya maksimum dapat dilakukan pada sudut tersebut dalam arah azimut. Sementara itu, pada arah vertikal antena memiliki pancaran daya maksimum pada semua sudut pancaran terhadap arah vertikalnya. Sehingga, posisi antena dapat diletakkan pada semua sudut arah elevasinya.

Gambar 9 menunjukkan bahwa pada arah horizontal antena *bowtie* terintegrasi reflektor AMC memiliki pancaran daya maksimum pada semua arah sudut dan pada arah vertikal antena memiliki pancaran daya maksimum pada 0°. Adapun bentuk pola radiasi yang diperoleh dapat digunakan untuk menentukan orientasi antena sehingga pancaran daya dari gelombang elektromagnetik dapat ditransmisikan dengan maksimum.

Pengukuran *gain* dengan antena referensi sebagai *transmitter* dan antena *bowtie* sebagai *receiver*. Hasil pengukuran eksperimental *gain* antena *bowtie* dengan dan tanpa reflektor AMC masing-masing bernilai 1,6 dan 4,2 dB. Nilai *gain* berdasarkan hasil simulasi masing-masing untuk antena *bowtie* tanpa dan dengan reflektor AMC adalah 1,74 dan 4,351 dB. Nilai *gain* hasil simulasi lebih tinggi dibandingkan dengan hasil eksperimental untuk antena *bowtie* dengan atau tanpa reflektor AMC. Hal tersebut diduga disebabkan oleh koneksi yang kurang baik

antara konektor dan *loss* kabel terhadap antena.

Setelah dilakukan simulasi beserta pengukuran terhadap antena hasil fabrikasi, perbandingan spesifikasi secara menyeluruh hasil simulasi dan eksperimen antara antena *bowtie* dengan dan tanpa reflektor AMC disajikan pada Tabel 5. Berdasarkan data pada Tabel 5, dapat dilihat bahwa penelitian ini telah berhasil merancang suatu metode dan prototipe integrasi reflektor AMC pada antena *bowtie* dan menghasilkan antena *transmitter* yang memenuhi spesifikasi untuk sistem GPR. Namun demikian, nilai *ringing level* yang dihasilkan antena *bowtie* terintegrasi reflektor AMC hasil simulasi masih belum memenuhi spesifikasi yang diharapkan. Hal tersebut diduga disebabkan oleh peningkatan nilai *gain* yang dihasilkan akibat integrasi reflektor AMC. Oleh sebab itu, perlu dilakukan perancangan metode lebih lanjut agar dihasilkan antena *bowtie* terintegrasi reflektor AMC dengan nilai *gain* yang tinggi namun memiliki nilai *ringing level* yang rendah.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, antena *bowtie* terintegrasi reflektor AMC telah berhasil difabrikasi dan memenuhi standar spesifikasi sebagai antena *transmitter* pada sistem GPR dengan frekuensi kerja 1,6–2,6 GHz dan frekuensi tengah 2,1 GHz. Integrasi reflektor AMC pada antena *bowtie* terbukti dapat meningkatkan *gain* dari 1,6 dB (tanpa reflektor) menjadi 4,2 dB dengan pola radiasi

unidireksional. Nilai-nilai *return loss*, *bandwidth*, dan VSWR juga telah memenuhi karakteristik sistem GPR yaitu masing-masing sebesar -15,17 dB, 510 MHz dan 1,15. Nilai *ringing level* yang dicapai berdasarkan simulasi sebesar -19,18 dB masih harus dioptimasi sehingga dapat sepenuhnya memenuhi standar antena untuk sistem GPR untuk kemudian direalisasikan.

REFERENSI

- [1] M. I. Skolnik, *Radar Handbook, Third Edition*. The McGraw-Hill, 2008.
- [2] Harry M. Jol, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier B.V., 2009.
- [3] 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*, 2002.
- [4] L. Liu, C. Zhang, Y. Liu, and Y. Hua, "A high gain and directivity bowtie antenna based on single-negative metamaterial," *J. Microwaves, Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 17, no. 2, pp. 246–259, 2018.
- [5] E. Mohd, S. Mohd, M. Yusof, J. Ali, and N. Abdullah, "Ultra-wideband antenna design for gpr applications: A review," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 8, no. 7, 2017.
- [6] P. Cao, Y. Huang, and J. Zhang, "A uwb monopole antenna for gpr application," *Proc. 6th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2012*, pp. 2837–2840.
- [7] L. O. Nur, A. Kurniawan, Sugihartono, and A. Munir, "Theoretical analysis of resonant frequency for amc-based absorber composed of square patch array," *Int. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 284–296, 2015.
- [8] C. Guo, "A 900MHz shielded bow-tie antenna system for ground penetrating radar," in *Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2009, pp. 1–5.
- [9] A. Munir, R. B. V. B. Simorangkir, and F. Kurniawan, "Late-time ringing characterization of cavity-backed uwb printed monopole antenna," *2017 IEEE Conf. Antenna Meas. Appl. CAMA 2017*, vol. 2018-Janua, 2018, pp. 419–422.
- [10] L.-R. Zhong, G.-M. Yang, and Y.-W. Zhong, "Gain enhancement of bow-tie antenna using fractal wideband artificial magnetic conductor ground," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 4, pp. 315–317, 2015.
- [11] L. O. Nur, M. F. Hizbuddin, dan B. S. Nugroho, "Pengembangan antena fleksibel mikrostrip bowtie", *TELKA*, vol. 5, no. 2, hal. 130–138, 2019.