

# PERANCANGAN ANTENA MONOPOL CETAK UNTUK KOMUNIKASI ULTRA WIDEBAND DENGAN ANALISIS MODE KARAKTERISTIK

Denti Agustina Damayanti<sup>\*)</sup>, Teguh Prakoso, dan Aghus Sofwan

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)E-mail: denti.agustina27@gmail.com</sup>

## Abstrak

UWB (*Ultra Wideband*) adalah sistem komunikasi jarak pendek yang mempunyai *bandwidth* yang sangat lebar beroperasi pada frekuensi 3,1-10,6 GHz. Dengan *bandwidth* operasi UWB yang besar maka diperlukan suatu antena dengan *bandwidth* yang besar pula, salah satu pendekatan untuk memperlebar *bandwidth* antena adalah dengan menggunakan *Theory Characteristic Mode* (TCM). Perancangan antena monopol cetak pada frekuensi kerja 3,1-10,6 GHz menggunakan bahan FR-4 dengan ketebalan 1,575 mm, dan konstanta dielektrik sebesar 4,3. Simulasi pancaran gelombang elektromagnetik menggunakan perangkat lunak CST *Studio Suite* 2016. Dari hasil simulasi, antena monopol cetak mempunyai *bandwidth* 8,4 GHz dengan rentang frekuensi 2,5 – 10,9 GHz. Pada hasil simulasi frekuensi 3,1 GHz, 5 GHz, dan 10,6 GHz yang diperoleh nilai *return loss* kurang dari -10 dan VSWR sudah kurang dari 2, serta nilai gain lebih dari 2 dB dengan pola radiasi *omnidirectional*. Hasil pengukuran antena monopol cetak mempunyai *bandwidth* 7,735 GHz dengan rentang frekuensi 3,18-10,915 GHz. Pada hasil pengukuran frekuensi 3,1 GHz, 5 GHz, dan 10,6 GHz yang diperoleh nilai *return loss* kurang dari -10 dan VSWR sudah kurang dari 2, serta nilai gain sebesar 3,27 dB dengan pola radiasi *omnidirectional*. Antena tersebut telah memenuhi spesifikasi komunikasi *ultra wideband*.

*Kata Kunci* : Antena monopol cetak, UWB, Theory characteristic mode

## Abstract

UWB (Ultrawideband) is a short-range communication system that has a very wide bandwidth operating at a frequency of 3.1-10.6 GHz. With a large UWB operating bandwidth, a large bandwidth antenna is required, one of the approaches to widen the antenna bandwidth is by using Characteristic Mode Analysis (CMA). The design of print monopole antenna at working frequency 3,1-10,6 GHz using material FR-4 with thickness 1,575 mm, and dielectric constant equal to 4,3. Simulation of electromagnetic waves using CST Studio Suite 2016 software. From the simulation results, print monopole antenna has a bandwidth of 8.4 GHz with a frequency range of 2.5 to 10.9 GHz. In the simulation result of frequency of 3.1 GHz, 5 GHz, and 10.6 GHz obtained the return loss value less than -10 and VSWR is less than 2, and the gain value more than 2 dB with omnidirectional radiation pattern. The result of measurement of print monopole antenna has bandwidth of 7.735 GHz with frequency range 3,18-10,915 GHz. In the result of measurement frequency of 3.1 GHz, 5 GHz, and 10.6 GHz obtained by return loss value less than -10 and VSWR have less than 2, and value of gain equal to 3,27 dB with omnidirectional radiation pattern. The antenna has met the ultrawideband communications specifications.

*Keywords*: Print monopole antenna, UWB, characteristic mode analysis

## 1. Pendahuluan

Teknologi radio *ultra-wideband* (UWB) adalah penemuan aplikasi dalam sistem komunikasi data nirkabel tingkat tinggi, yang digunakan untuk radio kognitif, radar, pencitraan biomedis, lokalisasi dalam ruangan, pelacakan dan lain-lain [1-2]. Meskipun pertimbangan desain antena biasanya ditentukan oleh aplikasi dan sistem pertimbangan tertentu, pada umumnya, antena monopol cetak berukuran kecil yang memiliki koefisien refleksi, gain, dan pola radiasi yang dapat menghasilkan *bandwidth* yang sangat lebar. Telah diketahui bahwa

antena monopol cetak UWB menawarkan fitur menarik seperti bentuk yang sederhana dan *bandwidth* yang sangat lebar yaitu 3 sampai 10 GHz, ukuran yang kecil, dan kemudahan manufaktur [1- 4].

Meskipun sejumlah antena monopol dicetak dengan kinerja yang optimal pada perancangan sebelumnya yang telah dipublikasikan, tetapi sangat sedikit jenis antena dengan analisis karakteristik perilaku fisik yang tersedia. Perilaku fisik pada antena dapat diketahui dengan *Theory Characteristic Mode* (TCM). TCM awalnya diusulkan oleh Garbacz [5] dan kemudian disempurnakan oleh

Harrington [6] menganalisis perilaku antenna untuk memberikan lebih banyak interpretasi fisik dari fenomena radiasi yang terjadi pada struktur. TCM juga telah berhasil digunakan untuk desain dan analisis berbagai antenna kawat dan planar [7,8]. Dalam perancangan ini TCM digunakan untuk memberikan wawasan fisik ke dalam perilaku yang memancar dari antenna monopul cetak *ultra wideband*.

Perancangan ini menggunakan monopul cetak dengan bevel dan upaya untuk merancang menggunakan teori mode karakteristik untuk mencapai operasi pada UWB yaitu frekuensi 3,1-10,6 GHz. Antena monopul cetak berbentuk bevel dianalisa kinerja *eigen value*, *modal significance*, dan *characteristic angle* dengan menggunakan teori mode karakteristik. Antena monopul cetak berbentuk bevel dirancang memiliki ukuran yang kecil yaitu  $40 \times 45 \times 1,6 \text{ mm}^3$  menggunakan bahan FR4 dengan ketebalan 1,6 mm, dan konstanta dielektrik sebesar 4,3. Pola radiasi yang digunakan adalah pola radiasi *omnidirectional*. Metode yang digunakan pada perancangan antenna ini yaitu dengan *characteristic mode analysis* (CMA) yang disimulasikan pada perangkat lunak CST *Microwave Studio* 2016 untuk mendapatkan desain terbaik berdasarkan frekuensi resonansi, *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), *return loss*, *gain*, dan pola radiasi.

## 2. Metode

### 2.1. Characteristic Mode Analysis (CMA)

*Characteristic mode* adalah *current mode* yang nyata yang dapat dihitung secara numerik untuk menentukan bentuk dan sifat dielectric secara acak. *Characteristic current modes*  $J_n$  dapat didefinisikan sebagai serangkaian arus nyata pada permukaan orthogonal tergantung bentuk objek dan ukuran. Total distribusi arus pada antenna adalah superposisi dari *characteristic mode* dengan koefisien pembobotan yang tepat. Karena *characteristic mode* membentuk serangkaian fungsi orthogonal, maka dapat digunakan untuk memperluas arus total pada permukaan *patch* antenna [9]. Menurut penelitian sebelumnya [9], hubungan mode dengan daya yaitu daya dapat dipancarkan oleh permukaan *patch* antenna. Sedangkan *characteristic current* yaitu serangkaian *characteristic fields*  $E_n$  yang dapat dihitung. Oleh karena itu, medan yang dipancarkan oleh antenna dapat dinyatakan sebagai superposisi *characteristic fields* atau *modal fields*. *Characteristic current modes* dapat diperoleh dengan fungsi eigen hal ini karena pembobotan pada persamaan *eigen value* sebagai berikut :

$$X(\vec{J}_n) = \lambda_n R(\vec{J}_n) \quad (1)$$

Dimana  $\lambda_n$  adalah *eigen value*,  $\vec{J}_n$  adalah arus eigen, dan R dan X adalah bagian real dan imajiner dari matiriks impedansi Z yang dihitung dengan memecahkan persamaan integral dengan menggunakan *Method of*

*Moments* (MoM). Setiap *characteristic mode* dikaitkan dengan *eigen value*,  $\lambda_n$ . Parameter ini memberikan pemahaman mengenai: magnitudo yang memberikan informasi tentang radiasi dari mode terkait dan daya reaktif dari mode yang sebanding dengan magnitudo pada *eigen value*. Dengan kata lain, pada mode tertentu *eigen value* dengan magnitudo yang kecil, dapat berkontribusi pada radiasi antenna saat dieksitasi [8]. *Eigen value* akan memberikan kontribusi untuk menyimpan energi magnetik pada mode dengan  $\lambda_n > 0$  atau menyimpan energi listrik ketika mode dengan  $\lambda_n < 0$ .

Kuantitas yang dikenal sebagai '*modal significance*' ( $MS_n$ ) umumnya digunakan untuk karakterisasi antenna dan menggambarkan amplitudo normal dari *current mode*.

$$MS_n = \left| \frac{1}{1+j\lambda_n} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (2)$$

$MS_n$  menentukan untuk berapa banyak jumlah mode yang berkontribusi terhadap radiasi. Resonansi untuk setiap mode terjadi secara ideal ketika  $\lambda_n = 0$  dimana pada saat itu *modal significance* berada pada nilai maksimum ( $MS_n = 1$ ).

### 2.2. Spesifikasi Antena

Antena yang dirancang adalah antenna monopul cetak dengan spesifikasi:

- Frekuensi kerja 3,1 GHz – 10,6 GHz
- Nilai *return loss*  $\leq -10$  dB pada frekuensi kerja
- Pola radiasi *omnidirectional*
- Gain*  $> 2$

### 2.3. Dimensi Patch

Antena yang dirancang adalah antenna monopul cetak dengan frekuensi kerja 3,1 GHz - 10,6 GHz dimana frekuensi tengahnya adalah 6,85 GHz,  $\epsilon_r = 4,3$ , dan  $c = 3 \times 10^8$ .

#### 2.3.1. Lebar patch (W) :

Untuk dapat menentukan lebar *patch* dari antenna mikrostrip, dapat digunakan persamaan (3). [10]

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3)$$

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 6,85 \times 10^9 \sqrt{\frac{4,3 + 1}{2}}}$$

$$W = 0,01336 \text{ m}$$

$$W = 13,36 \text{ mm}$$

#### 2.3.2 Panjang patch (L)

Untuk menentukan panjang (L) dari antenna mikrostrip digunakan persamaan sebelumnya kita harus mengetahui

nilai konstanta dielektrik efektif ( $\epsilon_{reff}$ ) bahan *substrat* terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan (4).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad (4)$$

Maka:

$$\epsilon_{reff} = \frac{4,3 + 1}{2} + \frac{4,3 - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{0,0016}{0,01336}\right)^{-1/2} = 3,79$$

Kemudian setelah konstanta dielektrik efektif ( $\epsilon_{reff}$ ) diketahui, kita dapat menghitung pertambahan panjang akibat adanya *fringing effect* yaitu  $\Delta L$  yang dapat dihitung dengan persamaan (5)

$$\Delta L = 0,412 \times h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (5)$$

$$h = 0,0016 \text{ m} = 1,6 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 0,412 \times 0,0016 \frac{(3,79 + 0,3) \left(\frac{0,01336}{0,0016} + 0,264\right)}{(3,79 - 0,258) \left(\frac{0,01336}{0,0016} + 0,8\right)}$$

$$\Delta L = 7,19 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\Delta L = 0,719 \text{ mm}$$

Dimana  $h$  merupakan tebal substrat kemudian panjang *patch* ( $L$ ) dirumuskan pada persamaan (6).

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (6)$$

Dimana  $L_{eff}$  merupakan panjang *patch* efektif yang dapat dirumuskan persamaan (7).

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (7)$$

Maka:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \times 6,85 \times 10^9 \sqrt{3,79}}$$

$$L_{eff} = 0,01125 \text{ m}$$

$$L_{eff} = 11,25 \text{ mm}$$

Sehingga hasil panjang *patch*nya adalah :

$$L = 0,01125 - (2 \times 7,19 \times 10^{-4})$$

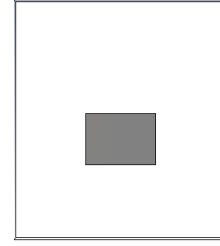
$$= 0,02582 \text{ m}$$

$$= \mathbf{9,812 \text{ mm}}$$

## 2.4. Desain Antena A (Ukuran Sesuai Perhitungan)

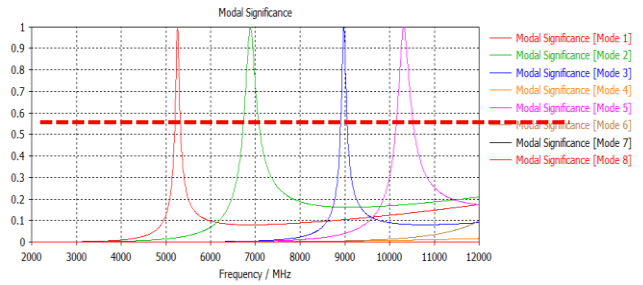
### 2.4.1. Desain Characteristic Mode Analysis Patch A

Pada Gambar 1 menampilkan desain *patch* antena A pada *characteristic mode analysis* (CMA)



Gambar 1. Desain Patch A dengan CMA

Gambar 2 menampilkan hasil *modal significant* desain *patch* A dengan mode aktif  $j_n$  dari antena A.

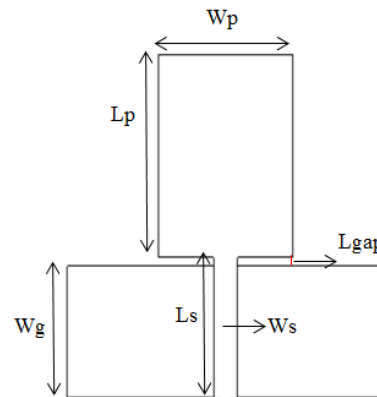


Gambar 2. Grafik Modal Significance patch A

*Modal significance patch* A, dari 8 mode yang diaktifkan hanya 4 mode saja yang mencapai nilai maksimum. Keempat mode yang mencapai nilai maksimum beresonansi dan didominasi radiasi dari frekuensi tinggi yaitu 5-10,5 GHz dan belum ada yang beresonansi pada frekuensi rendah seperti spesifikasi diharapkan yaitu 3,1 GHz.

### 2.4.2. Desain Antena A (Ukuran Sesuai Perhitungan)

Hasil perhitungan dan perancangan antena ditunjukkan pada tabel 1, sehingga didapatkan desain simulasi awal seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.



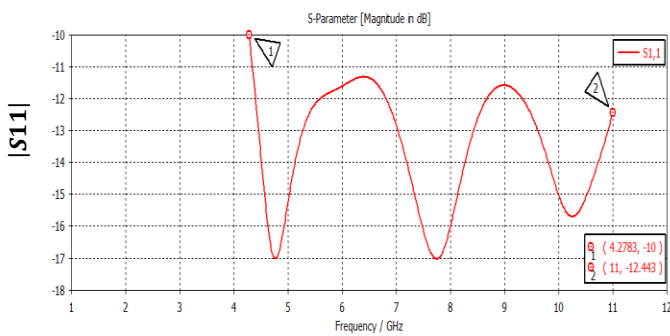
Gambar 3. Desain antena A untuk komunikasi UWB

Tabel 1. Ukuran desain antenna A untuk komunikasi UWB

Nama	Simbol	Value (mm)
Lebar patch	Wp	13,4
Panjang patch	Lp	9,8
Lebar ground	Wg	13
Lebar saluran	Ws	3
Panjang saluran	Ls	13,9
Sudut bevel	$\alpha$	-
Gap	Lgap	0,9

2.5. Hasil Simulasi Antena A  
2.5.1. Return Loss

Hasil *return loss* antenna A dapat ditampilkan pada grafik yang terdapat pada Gambar 4

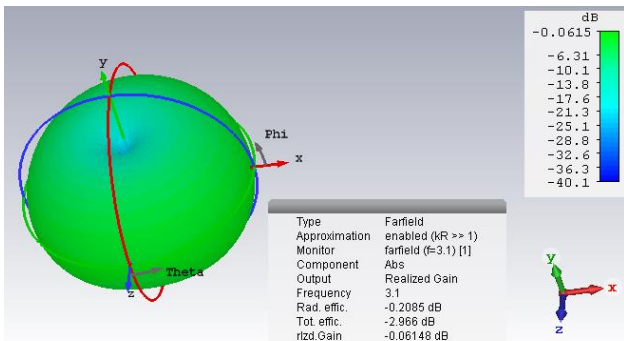


Gambar 4. Grafik Koefisien Refleksi |S11| Terhadap Frekuensi Desain Antena A

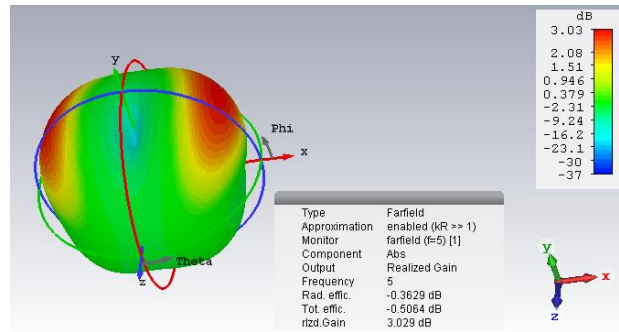
Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa frekuensi antenna A adalah 4,3-11 GHz dimana hasil tersebut belum memenuhi frekuensi yang diharapkan spesifikasi yaitu 3,1-10,6 GHz.

2.5.2. Gain dan pola radiasi

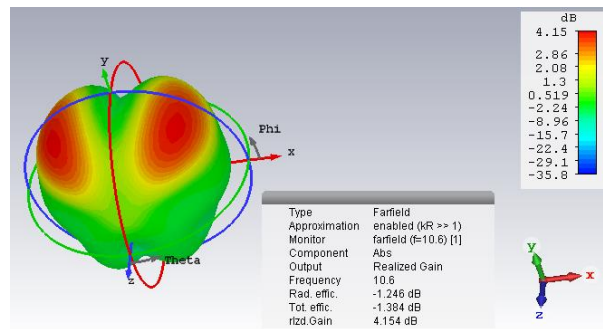
Hasil pola radiasi dan *gain* antenna A pada frekuensi 3,1 GHz, 5 GHz, dan 10,6 GHz dapat dilihat pada Gambar 5 sampai Gambar 7



Gambar 5. pola radiasi antenna A frekuensi 3,1 GHz.



Gambar 6. pola radiasi antenna A frekuensi 5 GHz.



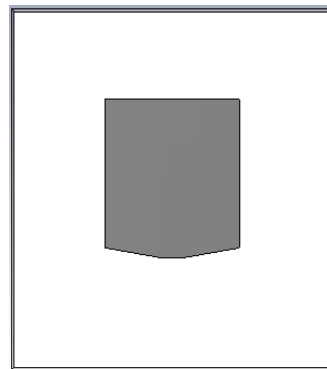
Gambar 7. pola radiasi antenna A frekuensi 5 GHz.

Berdasarkan Gambar 5-7, terlihat bahwa nilai *gain* antenna A pada frekuensi 3,1 GHz sebesar -0,1 dB dimana nilai *gain* tersebut belum memenuhi spesifikasi diharapkan yaitu *gain* > 2 dB. Sedangkan nilai *gain* antenna A pada frekuensi 5 GHz dan 10,6 GHz sudah lebih dari 2 dB.

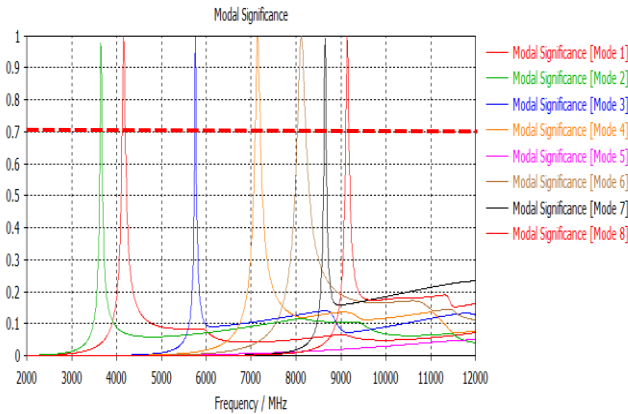
2.6. Desain Antena B (Parameter Studi dari Antena A)

2.6.1. Desain Characteristic Mode Analys Patch B

Pada Gambar 8 menampilkan desain patch antenna B pada *characteristic mode analysis (CMA)*.



Gambar 8. Desain Patch B dengan CMA

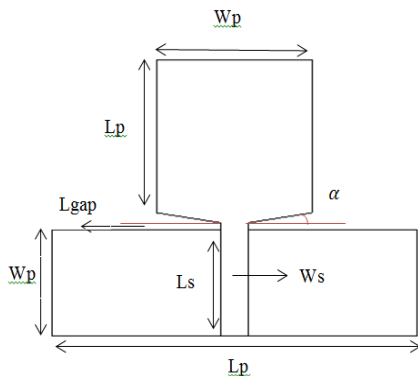


Gambar 9. Grafik Modal Significance patch B

Modal Significance patch B, dari 8 mode yang diaktifkan terdapat 7 mode yang mencapai nilai maksimum. Dari ketujuh mode yang mencapai nilai maksimum sudah beresonansi dan mendominasi radiasi dari frekuensi rendah yaitu 3-4 GHz dan beresonansi pada frekuensi tinggi yaitu 6-10 GHz sehingga sudah dapat berpengaruh untuk frekuensi *ultra wideband* yaitu 3,1-10,6 GHz.

2.6.2. Desain Antena B (antena dengan bevel)

Desain antena B merupakan desain antena yang hasilnya sudah memenuhi spesifikasi. Desain antenna B ditampilkan pada Gambar 10 dan ukuran desain antena B di tunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 10. Desain antenna B untuk komunikasi UWB

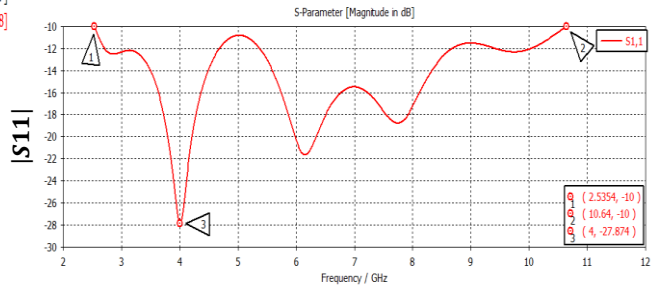
Tabel 2. Parameter Akhir Antena Monopol Untuk Komunikasi UWB

Name	symbol	Value
Lebar patch	Wp	17
Panjang patch	Lp	20
Lebar ground	Wg	13
Panjang ground	Lg	40
Lebar saluran	Ws	3
Panjang saluran	Ls	13.9
Sudut bevel	$\alpha$	5°

2.7. Hasil Simulasi Antena B

2.7.1. Return Loss

Hasil *return loss* antena B dapat ditampilkan pada grafik yang terdapat pada Gambar 11.

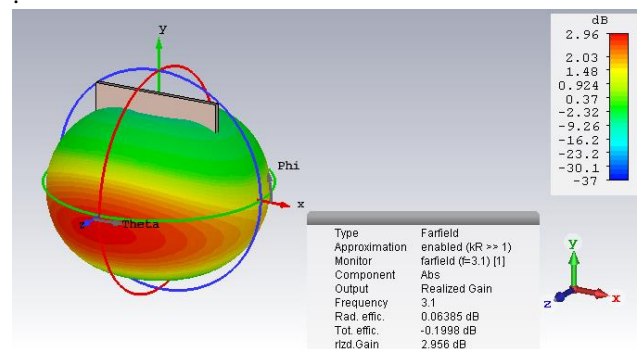


Gambar 11. Grafik Koefisien Refleksi |S11| Terhadap Frekuensi Hasil Simulasi Antena B

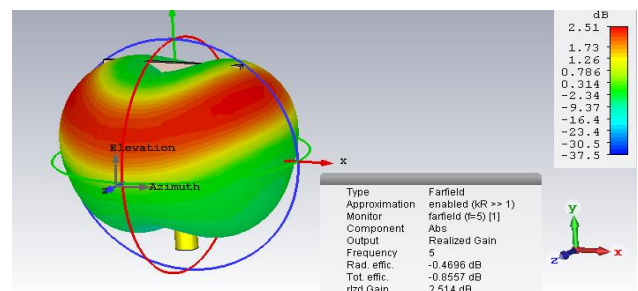
Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa frekuensi antena B adalah 2,5-10,6 GHz dimana hasil tersebut sudah memenuhi frekuensi yang diharapkan spesifikasi yaitu 3,1-10,6 GHz.

2.7.2. Gain dan pola radiasi

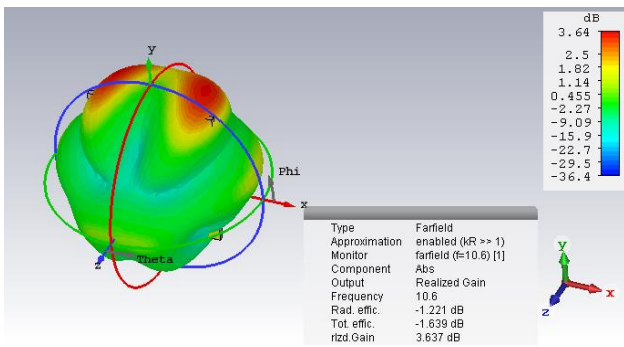
Hasil pola radiasi dan *gain* antena B pada frekuensi 3,1 GHz, 5 GHz, dan 10,6 GHz dapat dilihat pada Gambar 12 sampai Gambar 14



Gambar 12. pola radiasi antena B frekuensi 3,1 GHz.



Gambar 13. pola radiasi antena B frekuensi 5 GHz.



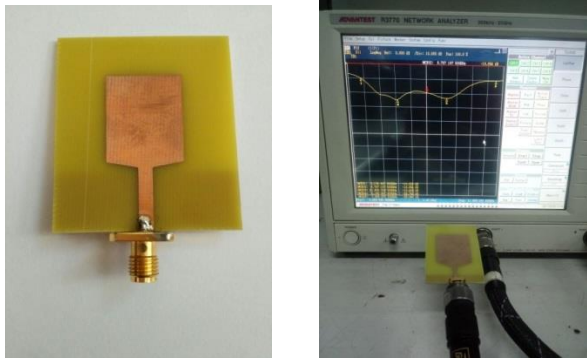
Gambar 14. pola radiasi antenna B frekuensi 310,6 GHz.

Dari Gambar 12 sampai Gambar 14 didapat besar *gain* antenna monopol cetak pada frekuensi 3,1 GHz, 5 GHz, dan 10,6 GHz adalah 2,956 dB, 2,514 dB, dan 3,637 dB. Besar *gain* lebih besar dari 2 dB menunjukkan *gain* sudah sesuai spesifikasi.

### 3. Hasil dan Analisa

#### 3.1. Fabrikasi antenna monopol cetak

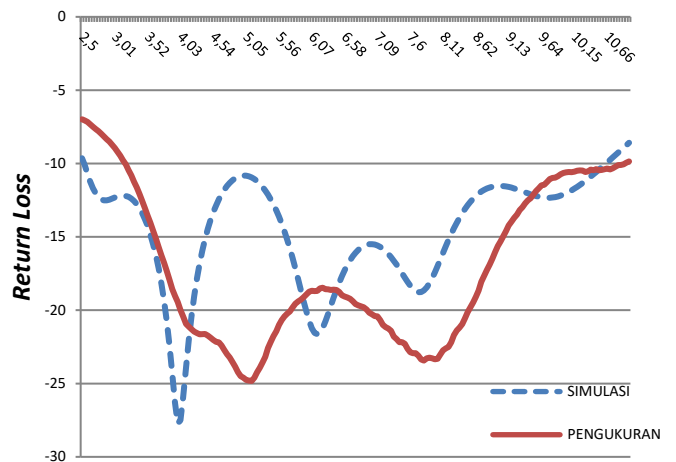
Penelitian ini merancang antenna monopol cetak yang dapat dilihat pada Gambar 15. Spesifikasi dan dimensi perancangan antenna monopol cetak sesuai dengan parameter yang didapatkan dari studi parameter simulasi antenna. Perancangan antenna menggunakan port SMA *female* dengan bahan *substrat* adalah *copper* yang memiliki konstanta dielektrik 4,3 dan ketebalan *substrat* 1,6 mm.



Gambar 15. Hasil Fabrikasi antenna monopol cetak desain B.

#### 3.2. Pengukuran Return Loss

Pengukuran *return loss* pada antenna menggunakan Advantest R3770 Network Analyzer. Perangkat Vector Network Analyzer dapat menganalisis *scattering parameter*, *return loss* dan VSWR. Hasil pengukuran menggunakan adalah berupa grafik frekuensi terhadap waktu sehingga dapat dianalisis lebih dalam. Hasil pengukuran *return loss* dan VSWR ditampilkan dalam bentuk grafik kurva. Perbandingan *return loss* simulasi dan pengukuran dapat dilihat pada Gambar 16.



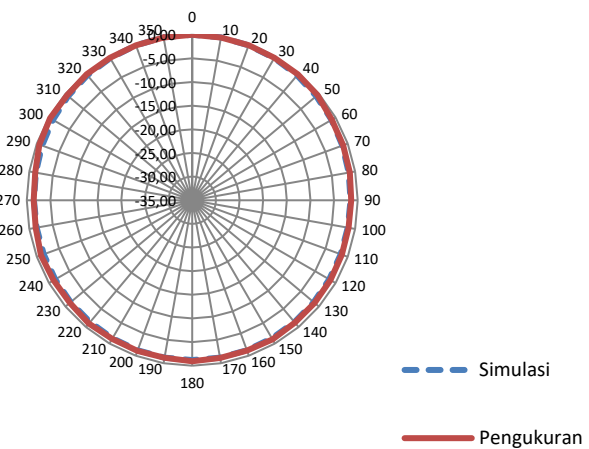
Gambar 16. Grafik perbandingan *return loss* hasil simulasi dan pengukuran

Tabel 3. Frekuensi pada *return loss* = -10 dB antenna monopol Cetak

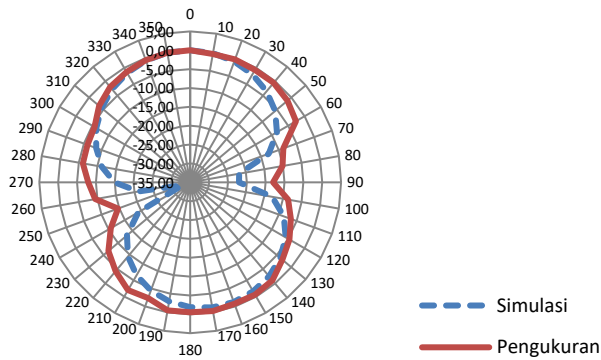
Frekuensi	Nilai <i>Return loss</i> = -10 dB (GHz)	
	Simulasi	Pengukuran
Frekuensi Bawah	2,5425	3,18
Frekuensi Atas	10,6175	10,915

#### 3.3. Pengukuran Pola Radiasi

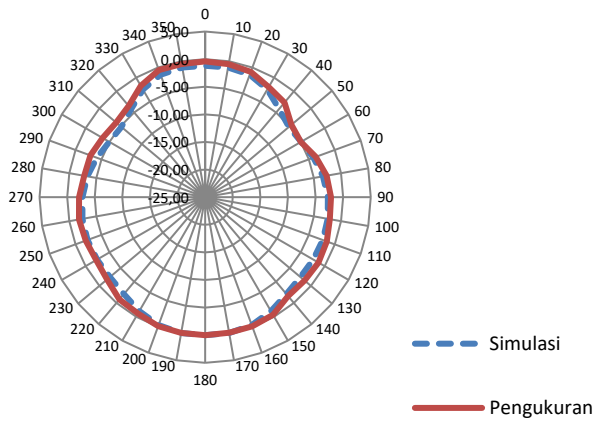
Pengukuran pola radiasi dan polarisasi antenna yang ideal adalah dilakukan di ruang tanpa gama untuk menghilangkan interferensi dari sinyal lain. Gambar 17-22 memperlihatkan perbandingan pola radiasi simulasi dan pengukuran pada frekuensi 3,1 GHz, 5 GHz, dan 10,6 GHz.



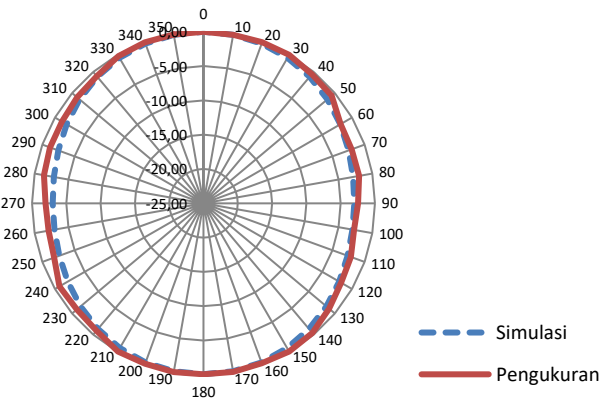
Gambar 17. Perbandingan pola radiasi *azimuth* antenna monopol cetak  $\phi = 0^\circ$  frekuensi 3,1 GHz.



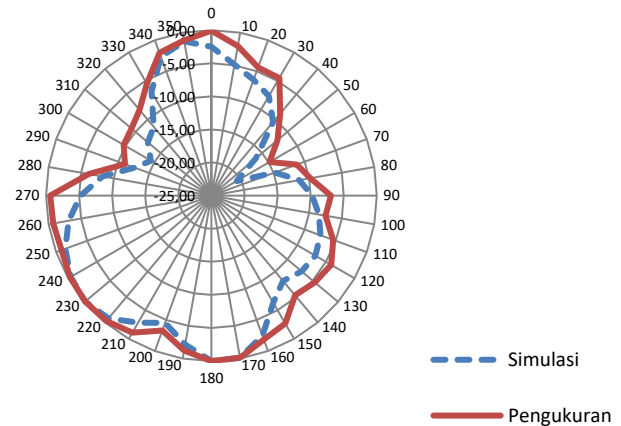
Gambar 18. Perbandingan pola radiasi *elevasi* antenna monopol cetak  $\phi = 90^\circ$  frekuensi 3,1 GHz.



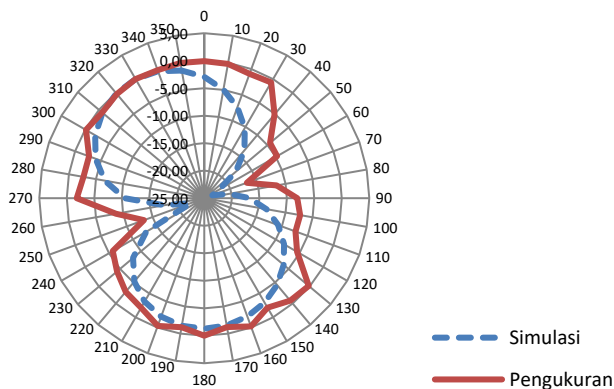
Gambar 21. Perbandingan pola radiasi *azimuth* antenna monopol cetak  $\phi = 0^\circ$  frekuensi 10,6 GHz.



Gambar 19. Perbandingan pola radiasi *azimuth* antenna monopol cetak  $\phi = 0^\circ$  frekuensi 5 GHz.



Gambar 22. Perbandingan pola radiasi *elevasi* antenna monopol cetak  $\phi = 90^\circ$  frekuensi 10,6 GHz.



Gambar 20. Perbandingan pola radiasi *elevasi* antenna monopol cetak  $\phi = 90^\circ$  frekuensi 5 GHz.

Pada Gambar 17 sampai Gambar 22 hasil perbandingan simulasi dengan pengukuran pola radiasi sudah mendekati untuk bidang azimuth dan elevasi. Perbedaan yang terjadi antara simulasi dengan pengukuran disebabkan karena kurang presisinya pembuatan antenna, serta pengukurannya masih dilakukan dengan manual (bukan menggunakan mesin). Kuncup utama pola radiasi pengujian terdapat dua nilai daya terima terbesar, hal ini menunjukkan bahwa antenna monopol cetak mempunyai pola radiasi *omnidirectional*.

### 3.4. Evaluasi Performansi Antena

Setelah melakukan pengujian pada semua parameter antena, dilakukan evaluasi hasil untuk membandingkan hasil pengujian dengan spesifikasi yang diinginkan. Hasil perbandingan pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 4. Perbandingan hasil pengujian antena dengan spesifikasi antenna monopole cetak**

Parameter	Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
Frekuensi kerja (GHz)			
<i>return loss</i> $\leq -10$ dB)	3,1-10,6	2,5-10,8	3,1-10,9
Impedansi (Ohm)	50	50	50
Gain 3,1 GHz (dB)	$\geq 2$	2,9	3,1
Gain 5 GHz (dB)	$\geq 2$	2,5	2,6
Gain 10,6 GHz (dB)	$\geq 2$	3,6	3,7
Polaradisi	Omnidirectinal	Omnidirectinal	Omnidirectinal

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengukuran, antena monopole cetak bekerja pada frekuensi *ultra wideband* 3,1-10,9 GHz untuk *return loss* kurang dari -10 dB dan  $VSWR \leq 2$ . Nilai *gain* antena monopole cetak pada frekuensi 3,1 GHz, 5 GHz, dan 10,6 GHz sebesar 2,1 dB, 2,6 dB, dan 3,7 dB. Nilai *gain* pengukuran sudah mendekati nilai *gain* pada simulasi hanya selisih 0,1-0,2 dB pada setiap sampel frekuensi yang diuji. Pola radiasi yang dihasilkan adalah omnidirectional. Hasil dari simulasi dan pengukuran sudah sesuai dengan spesifikasi.

## Referensi

- [1]. Hans Gregory Schantz, "A Brief History of UWB Antennas," *The Proceedings of The 2003 IEEE UWBST Conference*, 2013.
- [2]. Qi Wu, Ronghong Jin, Junping Geng, and Min Ding, "Printed Omni-Directional UWB Monopole Antenna With Very Compact Size," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 3, 2008.
- [3]. Seong-Youp Suh, Warren L. Stutzman, and William A. Davis, "A New Ultrawideband Printed Monopole Antenna: The Planar Inverted Cone Antenna (PICA)," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 5, 2004.
- [4]. Aaron J. Kerkhoff, Robert L. Rogers, and Hao Ling, "Design and Analysis of Planar Monopole Antennas Using a Genetic Algorithm Approach," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 10, 2004.
- [5]. John D. Kraus, *Antennas*, 2nd Ed. New Delhi : Mcgraw-Hill Companies, 2001.
- [6]. C. A. Balanis, *Antenna Theory*, 3rd Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [7]. Y. Lu, Y. Huang, H.T. Chattha, and Y. Shen, "Technique for Minimising the Effects of Ground Plane on Planar Ultra-Wideband Monopole Antennas," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2011.
- [8]. Marta Cabedo-Fabres, Eva Antonino-Daviu, Alejandro Valero Nogueira and Miguel Ferrando Bataller, "The Theory Of Characteristic Modes Revisited: A Contribution To The Design Of Antennas For Modern Applications," *IEEE Antennas And Propagation Magazine*, Vol. 49, No. 5, 2007.
- [9]. R. Harrington and J. Mautz, "Theory of characteristic modes for conducting bodies," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 19, no. 5, pp. 622-628, Sep. 1971.
- [10]. John D. Kraus, *Antennas*, 2nd Ed. New Delhi : Mcgraw-Hill Companies, 2001.