

PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIKROSTRIP *PATCH DIAMOND* PADA FREKUENSI 500-3000 MHZ UNTUK APLIKASI RADAR PENEMBUS DINDING

DESIGN AND REALIZATION OF DIAMOND PATCH MICROSTRIP ANTENNA ON FREQUENCY 500-3000 MHZ FOR THROUGH WALL RADAR APPLICATION

Raditya Aprilyan Taviyasa¹, Dharu Arseno², Yuyu Wahyu³

^{1,2}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

³Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Bandung

¹radithaphrilyan@students.telkomuniversity.ac.id, ²darseno@telkomuniveristy.ac.id,
³yuwuwahyuas@ppet.lipi.go.id

Abstrak

Perkembangan di bidang teknologi khususnya teknologi radar memiliki peranan penting di berbagai sarana diantaranya sipil, militer, kesehatan, transportasi dan lain-lain. Salah satu komponen penting dari aplikasi radar penembus dinding adalah antenna. Antena radar penembus dinding harus memiliki *bandwidth* yang sangat lebar (*Ultra-Wideband* UWB) untuk menghasilkan kemampuan penetrasi dinding yang baik. Pada tugas akhir ini telah dirancang antena mikrostrip menggunakan *patch diamond*. Proses perancangan *patch diamond* menggunakan bahan *FR-4 Epoxy* dengan nilai ($\epsilon_r = 4.3$ dan $h = 1,6$ mm). Penggunaan *patch diamond* memiliki keunggulan seperti perancangan dimensi yang simpel serta mudah untuk mendapatkan *bandwidth* yang lebar. Hasil simulasi antena mikrostrip *patch diamond* memiliki *bandwidth* sebesar 2110 MHz pada rentang 890-3000 MHz. Sedangkan hasil realisasi memiliki *bandwidth* sebesar 2010 MHz pada rentang 990-3000 MHz. Hasil beberapa parameter antena lainnya pada simulasi dan realisasi memiliki nilai *return loss* ≤ -10 dB, *VSWR* ≤ 2 , *gain* ≥ 3 dBi, impedansi $\pm 50 \Omega$, polarisasi linier dan pola radiasi *omnidirectional*.

Kata kunci : TWR, UWB, antena mikrostrip, *patch diamond*, *FR-4 Epoxy*

Abstract

*Development in technology especially radar technology has important role in various facilities including civil, military, health, transportation and etc. One of its important components of through wall radar application is antenna. Through wall radar must has ultra wideband to get good penetration ability. This final project has designed microstrip antenna using diamond patch. The designing process of diamond patch involved using FR-4 Epoxy ($\epsilon_r = 4.3$ and $h = 1,6$ mm). The usage of diamond patch has its benefits like easy dimension design to get a wide bandwidth. Microstrip diamond patch antenna simulation shows a result that has 2110 MHz bandwidth in a range of 890-3000 MHz while realization antenna has bandwidth of 2010 MHz in a range of 990-3000 MHz. On that frequency, simulation and realization result of some other antenna parameters has return loss value of ≤ -10 dB, *VSWR* ≤ 2 , *gain* ≥ 3 dBi, impedance $\pm 50 \Omega$, linier polarization and omnidirectional radiation pattern.*

Keywords: TWR, UWB, microstrip antenna, *diamond patch*, *FR-4 Epoxy*

1. Pendahuluan

Radar penembus dinding (*Through-Wall Radar/TWR*) adalah salah satu dari perkembangan jenis radar saat ini. Sistem TWR mempunyai kemampuan untuk mendeteksi lokasi (yaitu, jarak dan sudut) suatu objek yang berada dibalik dinding^[1]. Radar jenis ini diaplikasikan untuk membantu korban yang terjebak pada saat terjadi bencana, penanganan gangguan terorisme, penyanderaan, dan sebagainya^[2]. Sistem komunikasi *Ultra-Wideband* (UWB) secara umum adalah sistem komunikasi yang menggunakan *bandwidth* yang sangat lebar^[4]. Komisi internasional, *Federal Communication Commission* (FCC) menetapkan bahwa penggunaan *bandwidth* pada Antena UWB harus memiliki *bandwidth* lebih dari 500 MHz atau memiliki *bandwidth* minimal 20% dari frekuensi tengah^[5].

Pada jurnal ini dirancang dan direalisasikan antena berbasis mikrostrip yang memiliki *bandwidth* yang sangat lebar (*Ultra Wideband* UWB). Penelitian tugas akhir ini bertujuan membuat antena mikrostrip yang mempunyai *bandwidth* sangat lebar (UWB) sebesar 2500 MHz pada rentang frekuensi 500-3000 MHz, *return loss* ≤ -10 dB, *VSWR* ≤ 2 , *gain* ≥ 3 dBi, impedansi $\pm 50 \Omega$, polarisasi linier dan pola radiasi *omnidirectional*. Perancangan ini menggunakan bahan substrat *FR-4 Epoxy*.

2. Ultra-Wideband (UWB)

Sistem komunikasi UWB didefinisikan sebagai skema nirkabel yang memiliki *bandwidth* $10 \text{ dB} \geq 500 \text{ MHz}$ atau memiliki fraksional *bandwidth* $\geq 20\%$ ^[7]. Fraksional *bandwidth* adalah faktor yang digunakan untuk menentukan klasifikasi sinyal apakah sinyal sebagai *narrowband*, *wideband* serta *ultra-wideband*.

$$\beta_f = \frac{BW}{f_c} \times 100 \% = \frac{(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)/2} \times 100 \% = \frac{2 \times (f_h - f_l)}{f_h + f_l} \times 100 \% \quad (1)$$

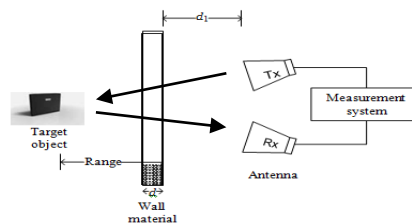
Adapun beberapa kelebihan dari sistem komunikasi *Ultra-wideband*, yaitu :

1. Kemampuan untuk berbagi spektrum frekuensi
2. Kapasitas kanal yang besar
3. Kemampuan untuk bekerja pada *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang rendah
4. Mempunyai probabilitas yang rendah dari *intercept* dan deteksi
5. Tahan terhadap *jamming*
6. Mempunyai performansi yang tinggi pada kanal *multipath*
7. Mempunyai penetrasi yang tinggi terhadap medium
8. Mempunyai arsitektur *transceiver* yang sederhana

3. Radar Penembus Dinding

Radar penembus dinding *Ultra-wideband* sangat baik digunakan untuk menerima sinyal informasi penting dalam mendeteksi target dibalik dinding. Beberapa informasi seperti: jumlah target, posisi target, serta kecepatan target yang berada dibalik dinding sangat diperlukan dalam radar jenis ini. Radar ini sangat baik dalam memperoleh beberapa informasi penting tersebut, karena mempunyai banyak kelebihan dalam sistemnya^[3]:

- Baik dalam melakukan penetrasi dari material-material dinding
- Spasial resolusi gambar (citra) yang bagus
- Berkemampuan untuk mendeteksi beberapa target
- Kebal terhadap noise



Gambar 1 Prinsip dasar radar penembus dinding

4. Through Wall Propagation

Radar penembus dinding memancarkan gelombang radio sebagai propagasinya. Gelombang yang dipancarkan oleh radar harus mampu menembus berbagai jenis dinding, seperti beton, bata, kayu dan lain-lain. Berbagai karakteristik yang dilalui gelombang untuk menembus dinding sangat perlu diperhatikan oleh sistem radar untuk mendeteksi keberadaan suatu target. Selain karakteristik, pemilihan *bandwidth* juga harus diperhitungkan untuk memperoleh ketelitian citra serta resolusi jarak yang diinginkan oleh sistem.

5. Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip dapat didefinisikan sebagai antena yang berbentuk papan tipis serta mampu bekerja pada frekuensi yang sangat tinggi^[10]. Antena mikrostrip terdiri dari 3 bagian, yaitu: *patch*, *substrate* dan *groundplane*. Dimensi antena mikrostrip dapat dicari dengan mengetahui beberapa parameter bahan yang digunakan, seperti tebal dielektrik (h) dan konstanta dielektrik (ϵ_r). Panjang antena mikrostrip juga harus disesuaikan, karena panjang antena mikrostrip mempengaruhi nilai *bandwidth* dan efisiensi radiasinya.

$$W = \frac{c}{2 f_o \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}}$$

Dimana W adalah lebar *patch* (mm), c adalah kecepatan cahaya diruang bebas ($3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$), f_o adalah frekuensi kerja antena (Hz) dan ϵ_r adalah konstanta dielektrik substrat (F/m). Nilai panjang *patch* memerlukan nilai dari pertambahan panjang akibat *fringing effect*.

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

(3)

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

(4)

$$L = L_{eff} - 2 \Delta L \tag{5}$$

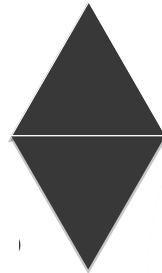
$$L_{eff} = \frac{c}{2 f_o \sqrt{\epsilon_{reff}}} \tag{6}$$

$$L_g = 6h + L \tag{7}$$

$$W_g = 6h + W \tag{8}$$

6. Patch Diamond

^[9]Patch diamond merupakan sebuah variasi dari bentuk antenna patch bowtie. Variasi tersebut menjadikan patch diamond lebih unggul dalam bandwidth dan karakteristik radiasi impulse. Tidak seperti patch bowtie, patch diamond tidak memerlukan penyesuaian balun untuk menyesuaikan 50 Ω feeds. Kualitas ini yang menjadikan patch diamond sangat cocok pada pengaplikasian UWB. Antena mikrostrip patch diamond ini sudah pernah digunakan untuk pencitraan penembus dinding, pencitraan penetrasi dedaunan, dan pendeteksi intrusi^[17].



Gambar 2 Geometri patch diamond^[9]

7. Perancangan dan Simulasi

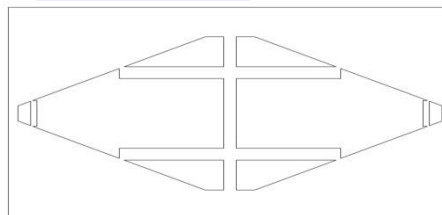
7.1 Spesifikasi Antena

Adapun spesifikasi teknik yang diinginkan adalah sebagai berikut :

- Frekuensi Kerja : 500 – 3000 MHz
- Frekuensi Tengah : 1750 MHz
- Impedansi Karakteristik : 50 Ohm
- Bandwidth : 2500 MHz
- Gain : ≥ 3 dBi
- Return Loss : ≤ -10 dB
- VSWR : ≤ 2 dB
- Polarisasi : Linier
- Pola Radiasi : Omnidireksional

7.2 Hasil Akhir Rancangan

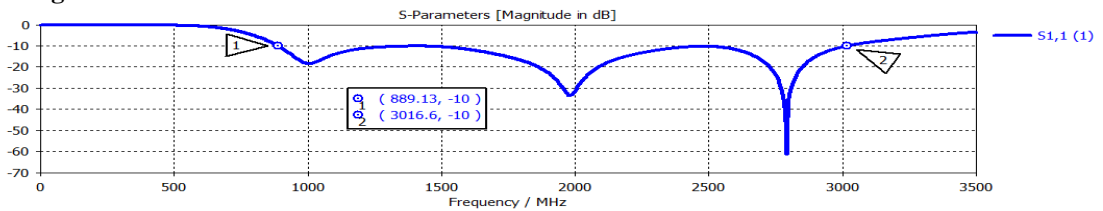
Adapun hasil rancangan dari antenna mikrostrip patch diamond seperti ini :



Gambar 3 Desain Akhir Antena Mikrostrip Patch Diamond

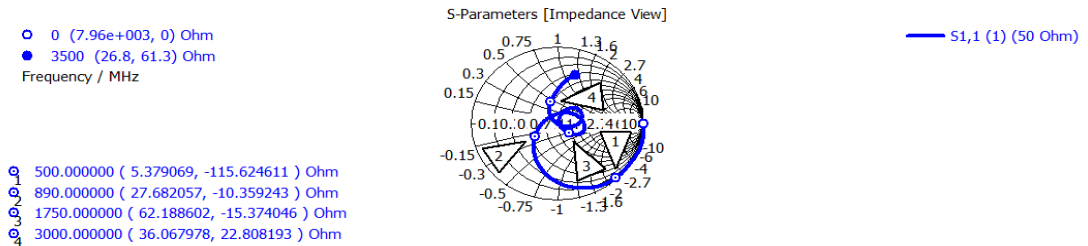
7.3 Hasil Simulasi

a. Pengukuran Medan Dekat



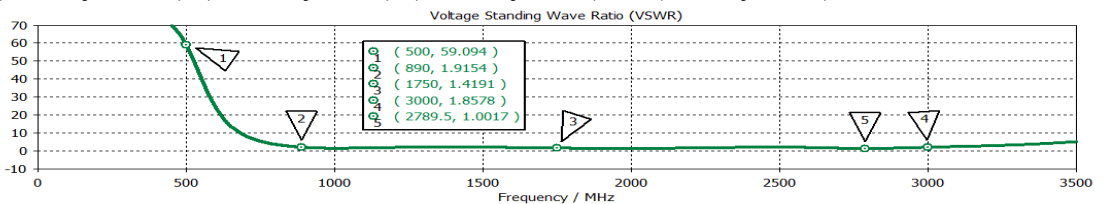
Gambar 4 Lebar Bandwidth pada Return Loss ≤ -10

Pada hasil simulasi, antenna mikrostrip *patch diamond* yang memenuhi standar bekerja pada frekuensi 890-3016 MHz, sehingga *bandwidth* yang dihasilkan sebesar 2126 MHz.



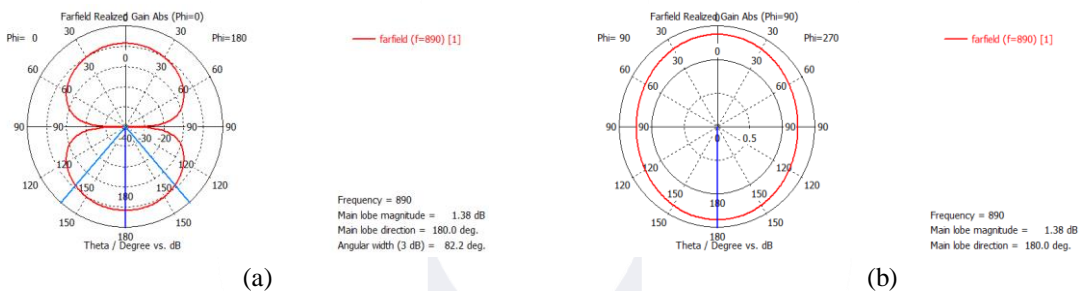
Gambar 5 Grafik Simulasi Impedansi 4 Titik Frekuensi

Hasil simulasi impedansi antenna mikrostrip *patch diamond* diambil 4 titik frekuensi, yaitu frekuensi terendah 500 MHz, frekuensi kerja terendah 890 MHz, frekuensi tengah kerja 1750 MHz dan frekuensi kerja tertinggi 3000 MHz. Empat titik frekuensi tersebut memiliki nilai impedansi berturut-turut sebesar (5.379, -j115.625); (27.682, -j10.359); (62.189, -j15.374) dan (36.068, j22.808).



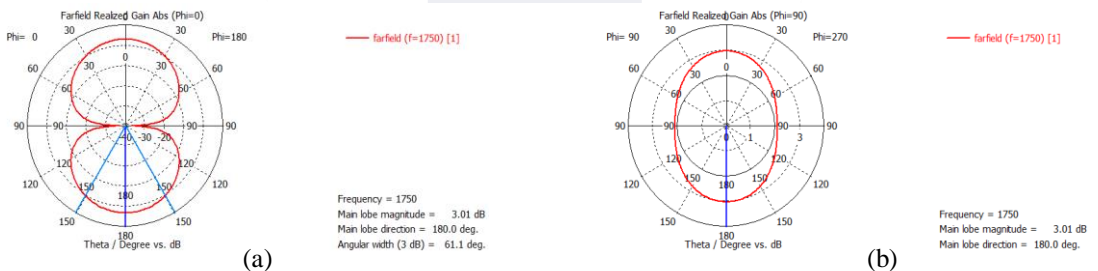
Gambar 6 Grafik Simulasi VSWR 5 Titik Frekuensi

b. Pengukuran Medan Jauh



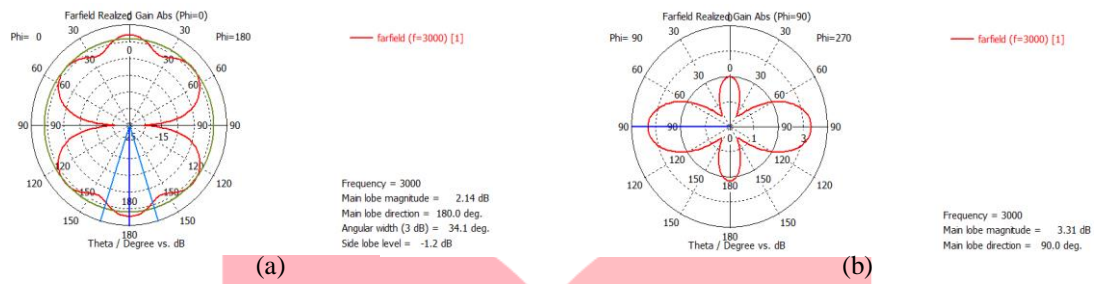
Gambar 7 (a) Pola Radiasi Azimut (b) Pola Radiasi Elevasi Pada Frekuensi 890 MHz

Pola radiasi di bidang azimut ($\phi=0^\circ$) terdapat *main lobe direction* pada sudut 180° dan HPBW sebesar $88,2^\circ$. Sedangkan pada bidang elevasi ($\phi=90^\circ$) terdapat *main lobe direction* pada sudut 180° .



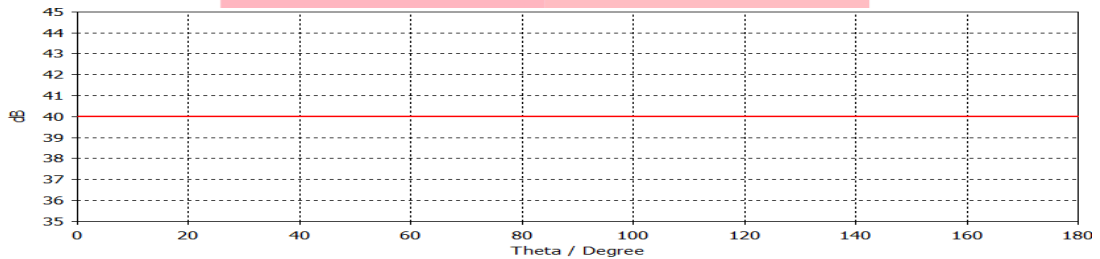
Gambar 8 (kiri) Pola Radiasi Azimut, (kanan) Pola Radiasi Elevasi Pada Frekuensi 1750 MHz

Pola radiasi di bidang azimut ($\phi=0^\circ$) terdapat *main lobe direction* pada sudut 180° dan HPBW sebesar $66,1^\circ$. Sedangkan pada bidang elevasi ($\phi=90^\circ$) terdapat *main lobe direction* pada sudut 180° .



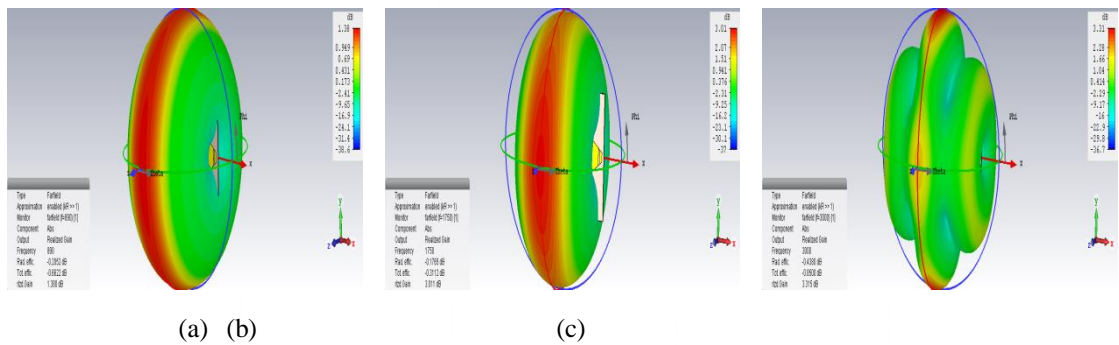
Gambar 9 (a) Pola Radiasi Azimut (b) Pola Radiasi Elevasi Pada Frekuensi 3000 MHz

Pola radiasi di bidang azimut ($\phi=0^\circ$) terdapat *main lobe direction* pada sudut 180° dan HPBW sebesar $34,1^\circ$. Sedangkan pada bidang elevasi ($\phi=90^\circ$) terdapat *main lobe direction* pada sudut 90° .



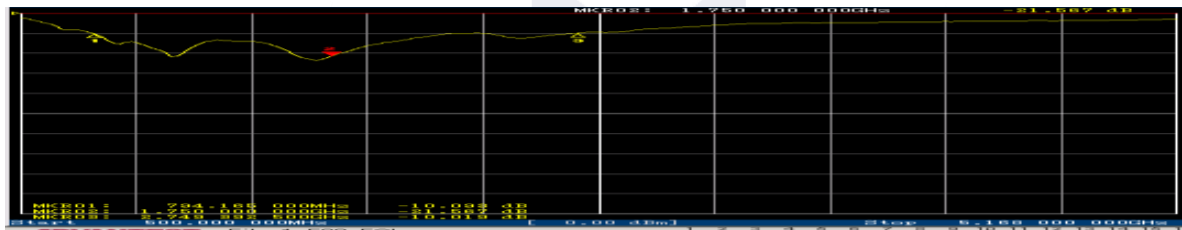
Gambar 10 Polarisasi Antena Mikrostrip Patch Diamond 890-3000 MHz

Berdasarkan dari hasil simulasi, dapat dilihat nilai *axial ratio* pada frekuensi 890, 1750 dan 3000 MHz berada pada nilai 40 dB. Nilai tersebut menunjukkan bahwa antena mikrostrip *patch diamond* memiliki polarisasi linier vertikal.



Gambar 11 Gain Antena Patch Diamond (a) 890 MHz, (b) 1750 MHz dan (c) 3000 MHz.

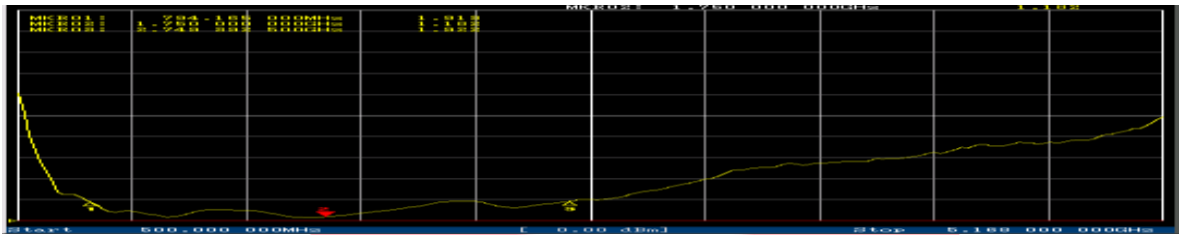
8. Pengukuran dan Analisis
8.1 Return Loss



Gambar 12 Hasil Pengukuran Bandwidth pada Return Loss ≤ -10

Nilai *return loss* simulasi pada frekuensi 890, 1750 dan 3000 MHz berturut-turut adalah sebesar -10.063 , -15.226 dan -10.453 dB. Sedangkan nilai *return loss* pengukuran pada frekuensi 890, 1750 dan 3000 MHz berturut-turut adalah sebesar -15.481 , -21.567 dan -8.235 dB. Kesimpulan dari data diatas menunjukkan bahwa hasil pengukuran *return loss* pada frekuensi 890 dan 1750 MHz sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

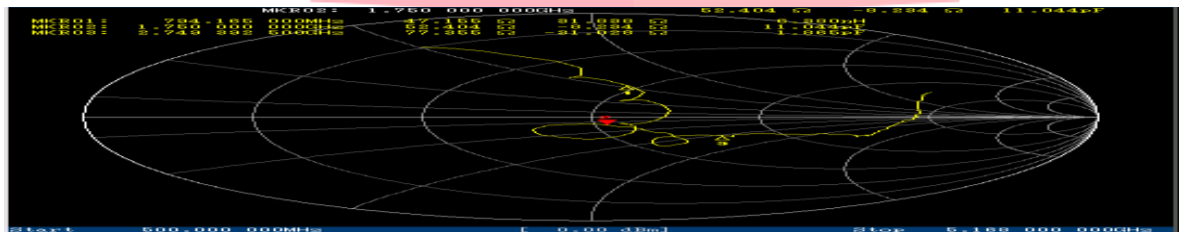
8.2 VSWR



Gambar 13 Hasil Pengukuran VSWR

Nilai VSWR simulasi pada frekuensi 890, 1750 dan 3000 MHz berturut-turut adalah sebesar 1.915, 1.419 dan 1.857. Sedangkan nilai VSWR pengukuran pada frekuensi 890, 1750 dan 3000 MHz berturut-turut adalah sebesar 1.404, 1.182 dan 2.265. Kesimpulan dari data diatas menunjukkan bahwa hasil pengukuran VSWR pada frekuensi 890 dan 1750 MHz sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

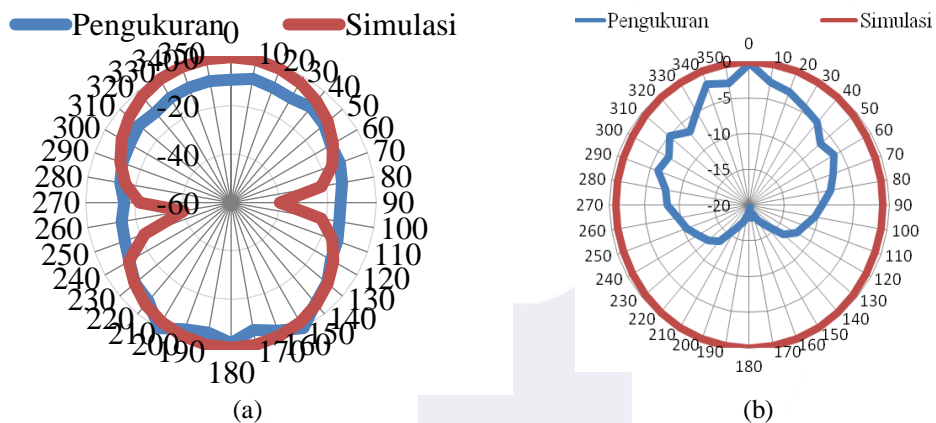
8.3 Impedansi



Gambar 14 Hasil Pengukuran Impedansi

Nilai impedansi simulasi pada frekuensi 890, 1750 dan 3000 MHz berturut-turut adalah sebesar (27.682-j10.359), (62.189-j15.374) dan (36.068+j22.808). Sedangkan nilai impedansi pengukuran pada frekuensi 890, 1750 dan 3000 MHz berturut-turut adalah sebesar (56.232 + j68.719), (52.404 – j8.234) dan (104.748 – j36.360). Kesimpulan dari data diatas menunjukkan bahwa hasil simulasi dan pengukuran impedansi masih menunjukkan hasil yang normal karena masih mendekati nilai 50 Ω agar terjadinya transfer daya maksimum.

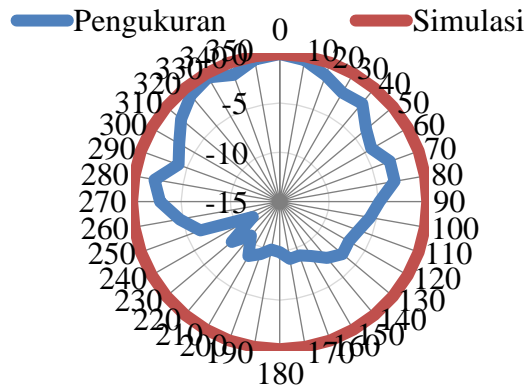
8.4 Pola Radiasi



Gambar 15 (a) Pola Radiasi Azimut (b) Pola Radiasi Elevasi Hasil Simulasi dan Pengukuran

Berdasarkan hasil pengukuran dan simulasi terlihat bahwa pola radiasi baik secara azimut dan elevasi memiliki pola radiasi omnidireksional. Hal itu menunjukkan karena daya yang tersebar memancar hampir ke segala arah.

8.5 Polarisasi



Gambar 10 Grafik Polarisasi Simulasi dan Pengukuran

Berdasarkan hasil pengukuran polarisasi antenna seperti yang terlihat pada gambar diatas, jenis polarisasi antenna yang direalisasikan adalah elips.

8.6 Gain

Pengukuran gain dilakukan dengan menggunakan antenna referensi, dalam hal ini antenna referensi menggunakan antenna horn standar yang memiliki nilai gain 12 dBi. Prosedur pengukuran dengan memposisikan antenna referensi sebagai pengirim dan AUT sebagai penerima, dan sebaliknya. Pengukuran hasil gain dilakukan pada frekuensi tengah kerja yaitu 1750 MHz. Hasil pengukuran gain dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 1 Hasil Pengukuran Gain

$P_1 (Rx)$	-43.72	Dimana :	$P_1 (Rx)$	= Daya yang diterima AUT pada saat AUT sebagai penerima
$P_2 (Tx)$	-34.70		$P_2 (Tx)$	= Daya yang diterima AUT pada saat AUT sebagai pengirim
P_{ref}	12		P_{ref}	= Daya antenna referensi

Berdasarkan tabel diatas dapat dihitung gain yang diperoleh dengan menggunakan rumus :

$$Gain = P_1(Rx) - P_2(Tx) + P_{ref}$$

$$Gain = -43.72 - (-34.70) + 12$$

$$Gain = 2.98 \text{ dBi}$$

Dari hasil diatas, nilai gain yang dihasilkan sudah memenuhi spesifikasi awal yang ditentukan yaitu ≥ 3 dBi.

8.7 Analisa Kinerja Sistem

Tahap ini adalah tahap perbandingan antara nilai parameter pada spesifikasi, simulasi dan pengukuran yang diambil dari frekuensi tengah kerjanya.

Tabel 2 Perbandingan Spesifikasi, Simulasi dan Realisasi

Parameter	Spesifikasi	Simulasi	Realisasi
Frekuensi Kerja	500-3000 MHz	890-3016 MHz	795-2749 MHz
Frekuensi Tengah	1750 MHz	1750 MHz	1750 MHz
Bandwidth	2500 MHz	2126 MHz	1954 MHz
Return Loss	≤ -10 dB	-15.226 dB	-21.567 dB
VSWR	≤ 2	1.4191	1.182
Impedansi (Ω)	50	62.189, -j15.374	52.404 - j8.234
Gain (dBi)	≥ 3	3.01	2.98
Polarisasi	linier	linier	elips
Pola Radiasi	Omnidireksional	Omnidireksional	Omnidireksional

Pada hasil simulasi, lebar bandwidth yang diperoleh sebesar 2126 MHz. Walaupun bandwidth yang diperoleh pada hasil simulasi tidak sesuai spesifikasi, akan tetapi bandwidth yang diperoleh masuk dalam

kategori Ultra Wideband. Hasil simulasi memiliki fraksional *bandwidth* 121.48% terhadap frekuensi tengahnya ($f_c=1750$ MHz). Sedangkan pada hasil pengukuran, beberapa hasil yang diperoleh telah sesuai dengan spesifikasi. Hasil pengukuran memperoleh *bandwidth* sebesar 1954 MHz sehingga mempunyai fraksional *bandwidth* sebesar 111.65% terhadap frekuensi tengahnya ($f_c=1750$ MHz). Pada hasil pengukuran diperoleh rentang frekuensi 795-2749 MHz, sedangkan pada hasil simulasi diperoleh rentang frekuensi 890-3016 MHz. Hal tersebut terjadi karena adanya pergeseran frekuensi pada tahap pengukuran.

9. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran dari perancangan, simulasi dan realisasi antenna mikrostrip *patch diamond* pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Antena UWB mikrostrip *patch diamond* dapat direalisasikan untuk aplikasi *Through Wall Radar* pada rentang frekuensi 795-2749 MHz.
2. Spesifikasi antenna mikrostrip *patch diamond* yang dirancang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, yaitu pada simulasi memiliki *bandwidth* 2126 MHz sedangkan pada pengukuran memiliki *bandwidth* sebesar 1954 MHz.
3. Metode optimasi pemotongan sudut dan penambahan slot pada *patch diamond* menghasilkan *bandwidth* yang lebar.
4. Tingkat ketelitian dan ketepatan pada saat pengukuran sangat mempengaruhi karakteristik antenna yang menyebabkan hasil simulasi dan pengukuran berbeda.
5. Pemilihan bahan substrat yang tepat dapat menghasilkan hasil yang optimal pada antenna yang dirancang.
6. Penyolderan konektor harus dilakukan seoptimal mungkin.
7. Menggunakan metode optimasi yang lain seperti fraktal antenna.

Daftar Pustaka:

- [1] Ponto, Aldino. (2014). "PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIKROSTRIP ULTRAWIDEBAND (UWB) BERBENTUK DUAL ELIPS UNTUK RADAR PENEMBUS TEMBOK". Tugas Akhir pada Universitas Telkom, 2014.
- [2] Tarigan, Yudha. (2015). "PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIKROSTRIP ULTRA WIDEBAND (UWB) PADA FREKUENSI 500-3000 MHZ UNTUK RADAR PENEMBUS DINDING". Tugas Akhir pada Universitas Telkom, 2015.
- [3] Ultra-Wideband Radar Technology, J.D. Taylor, 2001, CRC Press.
- [4] M. G. diBenedetto, T. Kaiser, A. F. Molisch, I. Opperman, C. Politano, and D. Porcino (eds.), *UWB communications systems, a comprehensive overview*. EURASIP publishing, 2005.
- [5] Federal Communications Commission (FCC). 2002. First Report and Order in The Matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultrawideband Transmission Systems, ET-Docket 98-153, FCC 02-48.
- [6] Aftanas, Michael Ing. 2009. "THROUGH WALL IMAGING WITH UWB RADAR SYSTEM". Thesis of University of Košice.
- [7] Nekooger.book , "Introduction to Ultra-Wideband Communication", August 5, 2005.
- [8] G. Roberto Aiello and Gerald D. Rogerson, "Ultra-Wideband Wireless system" IEEE Microwave Magazine, June, 2003.
- [9] Amin, Moeness G., "Through-the-Wall Radar Imaging" book, 2011, CRC Press.
- [10] Surjati, I, 2010, Antena Mikrostrip: Konsep dan Aplikasinya, ISBN:978-979-26-8952-0, Universitas Trisakti: Jakarta.
- [11] Balanis, C.A., 2005, *Antena Theory Analysis and Design*, third edition, Wiley inc: New Jersey.
- [12] Julardi, Neronzie, 2013, *Rancang Bangun Antena Mikrostrip Patch Circular (2,45 GHz) Dengan Teknik Planar Array Sebagai Penguat WI-FI*, Medan, Universitas Sumatera Utara.
- [13] Sumanta, Suryana. (2013). *ANALISA BENTUK PATCH PADA ANTENA MIKROSTRIP UNTUK TEKNOLOGI ULTRA WIDEBAND RENTANG FREKUENSI 3.1-10.6 GHz*. Tugas Akhir pada Universitas Telkom: tidak diterbitkan.
- [14] Charles U. Ndujiuba. Adetokunbo O. Oloyede. 2015. *Selecting Best Feeding Technique of a Rectangular Patch Antenna for an Application*. International Journal of Electromagnetics and Applications.
- [15] Girish Kumar and K.P. Ray, "Broadband microstrip antennas", Artech House antennas and propagation library, page number: 132-138, ISBN 1-58053-244-6, 2003.
- [16] Sinaga, Apli Nardo. 2014. *Studi Perancangan Antena Susun Mikrostrip Patch Segiempat Dual-band (2,4 GHz dan 3,3 GHz)*. Skripsi Teknik Elektro Universitas Sumatera Utara.
- [17] Schantz, H. G. and L. Fullerton, The diamond dipole: A Gaussian impulse antenna, *IEEE APS International Symposium Digest*, 4, 100-103, 2001.