

ANTENA PHASED ARRAY UNTUK RADAR 3D S-BAND

4×4 PHASED ARRAY ANTENNA FOR S-BAND 3D RADAR

M. Elio Vica¹, Heroe Wijanto², Yuyu Wahyu,³

^{1,2}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

³Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

¹ eliovica@student.telkomuniversity.ac.id ² heroe@Telkomuniversity.ac.id ³ yuyu@ppet.lipi.go.id

Abstrak

Radar (*Radio Detection and Ranging*) merupakan perangkat yang memancarkan gelombang elektromagnetik ke suatu target dan menerima gelombang pantulan dari target yang diinginkan tersebut selama masih berada di dalam jangkauannya. Pada radar tiga dimensi, hasil yang ditampilkan tidak hanya berupa informasi jarak dan arah seperti radar 2 dimensi, tetapi juga ketinggian dan dimensi objek yang ditangkap oleh radar. Salah satu jenis antena pada radar adalah *phased array*, yang berfungsi untuk melakukan scanning target secara elektrik. Antena *phased array* merupakan sebuah antena yang terdiri dari elemen yang identik dengan susunan yang teratur dan diberikan arus catuan dengan pola bobot tertentu. Antena bekerja pada frekuensi S-Band (2,9 – 3,1 GHz) dan pada Tugas Akhir ini akan dirancang antena *phased array* mikrostrip 4×4 dengan software CST Studio Suite dan direalisasikan dengan bahan substrat FR-4 dan tembaga sebagai bahan untuk bagian groundplane dan patch antena. antena dirancang dengan metode coaxial feeding pada setiap patch dan menggunakan kabel catuan untuk mengatur beda fasa pada antena.

Kata Kunci : Radar, Antena *phased array*, S-Band.

Abstract

Radar (*Radio Detection and Ranging*) is a device that radiated electromagnetic wave to some targets and receiving reflection wave from target that wanted within its reach. In 3D radar the results that displayed not only distance and direction information like 2D radar, but also height and dimension of the captured object by the radar. One type of antenna on the radar is *phased array*, which function is to scanning electrically. *Phased Array* antenna is an antenna which consist of identical element and the structure is arranged orderly and given feeder cable with certain weight patterns. *This antenna works on S-Band frequency (2,9 – 3,1 GHz) and in this final assignment, a 4×4 phased array microstrip antenna will designed using CST Studio Suite and realize with FR-4 substrate material and copper as material for groundplane and patch of the antenna. The antenna designed with coaxial feeding method on each patch and using feeder cable to set the phase difference on the antenna.*

Keywords: Radar, Antena *phased array*, S-Band.

1. Pendahuluan

Radar (*Radio Detection and Ranging*) adalah suatu sistem deteksi gelombang radio yang berguna untuk mendeteksi, mengukur jarak dan memetakan map benda-benda seperti pesawat terbang, militer, informasi cuaca. Saat sekarang antena yang digunakan untuk radar sudah mulai menggunakan teknologi *Phased Array*. Teknologi antena *Phased Array* memungkinkan untuk melakukan scanning secara elektrik pada antena radar. Antena *Phased Array* merupakan antena yang terdiri dari dua set atau lebih antena. Sinyal dari beberapa set antena tersebut digabungkan untuk meningkatkan kinerja sebuah antena. Pada tugas akhir ini antena dirancang dan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak yang memiliki desain antena mikrostrip dan direalisasikan dengan bahan substrat FR-4 dan bahan tembaga untuk groundplane dan patch. Antena bekerja pada frekuensi S-band (2.9-3.1 GHz) dan menggunakan variasi kabel catu untuk mengatur beda fasa antena. Beda fasa antena yang akan digunakan pada penelitian ini adalah 25° dan 80° sebagai perbandingan antara hasil simulasi dengan pengukuran. Dengan spesifikasi tersebut antena *phased array* mampu bekerja dengan optimal untuk radar 3 Dimensi.

2. Dasar Teori

2.1 Radar 3 Dimensi

Radar (*Radio Detection and Ranging*) merupakan suatu perangkat yang digunakan untuk transmisi sinyal elektromagnetik dan menerima sinyal dari target yang diinginkan selama masih berada di dalam jangkauannya. Lokasi dari target dinyatakan dengan sinyal pantulan yang diterima radar dari target tersebut. Ada tiga komponen utama yang tersusun di dalam sistem radar, yaitu antena, transmitter (pemancar sinyal) dan receiver (penerima sinyal). Pada radar 3 dimensi, hasil yang ditampilkan berupa ketinggian, dimensi, jarak dan arah dari objek. Bandwidth sangat berpengaruh terhadap resolusi jarak radar. Sudut dari resolusi jarak radar bergantung terhadap lebar pulsa radar yang ditransmisikan. Lebar pulsa merupakan faktor utama dalam resolusi jarak antena radar. Sebuah sistem radar yang dirancang dengan baik, dengan faktor lain pada efisiensi maksimum, dapat membedakan objek yang dipisahkan sebesar satu setengah waktu lebar pulsa. Lalu, teoritisnya resolusi jarak pada sebuah sistem radar dapat dihitung melalui persamaan:

$$S_r = \frac{c_0 \cdot \tau}{2} \quad (2.3)$$

Dimana, c_0 : Kecepatan cahaya

τ : Lebar pulsa transmisi

S_r : Resolusi jarak sebagai jarak antara 2 target

Gain antena merupakan salah satu parameter yang sangat berpengaruh pada antena radar. Berikut adalah perhitungan kemampuan antena untuk memfokuskan energy keluar menjadi arah pancar yang diarahkan

$$G = \frac{\text{Intensitas radiasi maksimum}}{\text{Intensitas radiasi rata-rata}}$$

Gain antena menjelaskan dimana antena memusatkan energi elektromagnetik pada berkas sudut sempit.

2.2 Parameter Antena

- Pola Radiasi

Pola radiasi (*radiation pattern*) sebuah antena adalah hasil berbentuk grafis yang menggambarkan sifat radiasi antena tersebut pada medan jauh sebagai fungsi arah.

- Polarisasi Antena

Polarisasi antena dijelaskan sebagai arah vektor medan listrik telah diradiasikan oleh antena pada arah propagasi.

- Bandwidth

Bandwidth pada antena merupakan kemampuan antena beroperasi dan bekerja dalam ruang lingkup frekuensi kerja.

- Direktivitas

Direktivitas adalah nilai gain direktif di arah nilai maksimumnya atau bisa disebut dengan MAG (*Maximum Available Gain*). Direktivitas dapat dijelaskan sebagai perbandingan intensitas radiasi pada arah tertentu terhadap intensitas radiasi rata-rata U_0 .

- 5. Gain Antena

Gain antena merupakan perbandingan intensitas radiasi maksimum sebuah antena terhadap intensitas radiasi antena pembanding/referensi dengan daya maksimum yang sesuai dengan faktor efisiensi antena.

- 6. Impedansi Antena

Impedansi pada antena menjelaskan nilai antena di titik terminal *input*-nya atau perbandingan dari tegangan terhadap arus di titik terminal *input*-nya.

- 7. VSWR

VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) adalah perbandingan tegangan maksimum dan minimum pada suatu gelombang berdiri akibat adanya pantulan gelombang yang diakibatkan tidak *matching* nya impedansi *input* antena dengan saluran *feeder*. Dari VSWR ini bisa didapatkan berapa besar *bandwidth* antena yang diukur.

2.3 Antena Microstrip

Antena mikrostrip adalah sebuah antena yang dibuat dari sebuah konduktor yang ditempelkan pada suatu dielektrik. Pada antena mikrostrip biasanya terdiri dari 3 bagian, yaitu *conducting patch*, *substrate dielectric* dan *groundplane*.

- **Conducting patch**

yaitu lapisan paling atas pada antena mikrostrip ini yang terbuat dari bahan konduktor. Fungsi *conducting patch* ini adalah untuk meradiasikan gelombang elektromagnetik ke udara. Bentuk dari patch ini bermacam-macam, mulai dari segitiga, lingkaran, persegi atau berbentuk *fractal*. Pada tugas akhir ini bentuk patch yang digunakan adalah bentuk persegi.

- *Substrate dielectric*
merupakan lapisan tengah pada antenna yang dibuat dari bahan dielectric. Fungsi lapisan ini adalah untuk menyalurkan gelombang elektromagnetik dari catuan menuju patch.
- *Groundplane*
merupakan lapisan paling bawah dari antenna mikrostrip yang pada umumnya terbuat dari bahan konduktor. Fungsi lapisan ini adalah sebagai *reflector* sinyal yang tidak diinginkan.

2.4 Antena Mikrostrip Patch Segiempat

Pada Tugas Akhir ini patch yang digunakan yang berbentuk segiempat (persegi). *Patch* segiempat lebih sering digunakan karena sangat mudah pada proses analisis dan proses fabrikasi. Berikut pada gambar 2.3 memperlihatkan bentuk geometri dari *patch* mikrostrip segiempat dimana W dan L adalah lebar dan panjang dari *patch*, h adalah tebal substrat dan ϵ_r adalah konstanta dielektrik dari substrat.

2.5 Antenna Array

Antena Array merupakan sebuah antenna yang terdiri dari elemen identik dengan susunan yang teratur [1]. Pada tugas akhir ini, yang akan disusun secara array adalah pada bagian *patch*. Pada antenna *array* yang mempunyai elemen yang identik, ada beberapa parameter yang dapat digunakan untuk membentuk pola antenna, yaitu [5]:

- Bentuk konfigurasi susunan
- Jumlah elemen antenna
- Jarak antar elemen antenna
- Level amplitude masukan ke masing-masing elemen
- Fasa amplitude masukan ke masing-masing elemen
- Bentuk pola radiasi elemen

Untuk antenna *array* mempunyai beberapa macam konfigurasi (susunan) yang mempunyai keuntungannya masing-masing, antara lain:

- *Linear array*, adalah *array* yang titik pusat elemen *array* terletak pada satu garis lurus.
- *Planar array*, adalah *array* dengan susunan elemen *array* membentuk sebuah area yang berbentuk kotak.
- *Circular array*, adalah *array* dengan elemen *array* yang diletakkan pada suatu lingkaran dengan radius tertentu.

Antena *array* memiliki *Array Factor (AF)* yang merupakan faktor pengali dari medan elektrik dari elemen tunggal. *Array Factor* menentukan pola radiasi oleh antenna.

Apabila M elemen berada disepanjang koordinat x maka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$AF = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta x)} \quad (2.10)$$

Dimana I_{m1} =koefisien masing-masing elemen

Jarak dan pergeseran fasa antar unsur-unsur sepanjang sumbu x dinyatakan oleh d_x dan β_x .

Untuk N elemen yang berada disepanjang sumbu y, *array factor* dapat dinyatakan sebagai berikut

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta y)}$$

Atau

$$AF = S_{xm} S_{yn}$$

$$\text{Dimana} \quad S_{xm} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta x)}$$

$$S_{yn} = \sum_{n=1}^N I_{1n} e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta y)}$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa pola array yang berada di sumbu x sebanding dengan pola *array* yang ada di sumbu y.

2.6 Phase Shifter

Phase shifter merupakan sebuah alat yang digunakan untuk menambah atau menggeser fasa dari sinyal yang ditransmisikan pada sistem. Jika alat ini diaplikasikan pada antenna, *phase shifter* ini digunakan untuk menambah atau menggeser fasa dari sinyal diberikan ke antenna. Salah satu cara untuk menggeser fasa sinyal

yaitu dengan merubah panjang kabel pencatu pada elemen array [10]. Untuk menentukan berapa panjang kabel pencatu dapat dirumuskan ke dalam persamaan:

$$L = \frac{\varphi}{2\pi} \times \lambda$$

2.7 Teknik Pencatuan Antena

Teknik pencatuan antena dapat dilakukan dengan berbagai metode. Metode ini dapat dibagi menjadi 2 macam, yaitu metode terhubung (*contacting*) dan tidak terhubung (*non-contacting*). Pada penelitian ini antena menggunakan metode *coaxial feeding* atau koaksial. Keuntungan dari pencatuan koaksial adalah karakteristik impedansi yang diinginkan dapat diperoleh di lokasi yang tepat pada konduktor antena dan dengan menggunakan dua lapisan bahan karena efek dari ketebalan dan konstanta dielektrik (ϵ_r) dapat meningkatkan lebar pita dan mengurangi ukuran bentuk patch.

3.Perancangan dan Simulasi

Dalam menentukan dimensi suatu antena, frekuensi kerja sangat mempengaruhi ukuran suatu antena. Dalam tugas akhir ini antena yang dirancang bekerja pada frekuensi S-Band yaitu 2,9 -3,1 Ghz. Antena dirancang dengan bentuk patch *rectangular* dan metode *coaxial feeding*.

3.1 Perhitungan Dimensi Antena Mikrostrip

- Menentukan frekuensi tengah (f_c)

$$f_c = \frac{f_L + f_H}{2} = \frac{2,9 \times 10^9 + 3,1 \times 10^9}{2} = 3 \times 10^9 = 3 \text{ GHz}$$

- Menentukan panjang gelombang

$$\lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

- Menentukan Lebar patch (W)

$$W = \frac{V_0}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4,4 + 1}} = 0,03043 \text{ m} = 30,43 \text{ mm}$$

- Panjang patch (L)

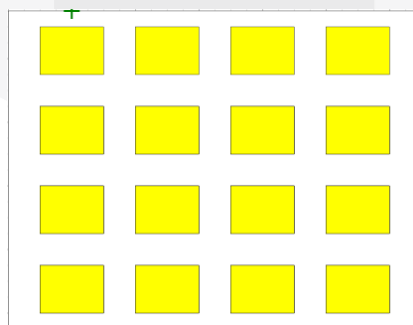
$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \left(\frac{h}{w} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{4,4 + 1}{2} + \frac{4,4 - 1}{2} \left[1 + 12 \left(\frac{1,67 \times 10^{-3}}{30,43 \times 10^{-3}} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} = 4,02$$

$$\Delta L = 0,412 h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} = 0,412 h \frac{(4,02 + 0,3) \left(\frac{30,43}{1,67} + 0,264 \right)}{(4,02 - 0,258) \left(\frac{30,43}{1,67} + 0,8 \right)} = 0,767 \text{ mm}$$

$$L = \frac{1}{2fr \sqrt{\epsilon_{reff} \mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L = \frac{1}{2 \times 3 \times 10^9 \sqrt{4,02 \sqrt{4\pi \times 10^{-7} \times 8,85 \times 10^{-12}}}} - 2\Delta L = 23,4031 \text{ mm}$$

- Lebar substrate (W_s)
 $W_s = 6h + W \text{ patch} = 40,45 \text{ mm}$
- Panjang substrate (L_s)
 $L_s = 6h + L \text{ patch} = 33,4231 \text{ mm}$
- Perhitungan Jarak Antar Elemen Antena
 $d = \frac{r}{2} = \frac{c}{2f} = 50 \text{ mm}$

Pada penelitian ini antena dirancang dengan patch rectangular sebanyak 4x4 atau 16 buah dan bentuknya antara lain seperti gambar berikut:



Gambar 1 Desain rancangan antena

3.2 Perhitungan Pergeseran Fasa Menggunakan Prinsip Perkalian Diagram pada Fasa 25⁰ dan 80⁰

▪ Fasa 25⁰

$$E_{tot} = 4E_0(e^{-j4,71238898 \sin \theta} + e^{-j1,570796327 \sin \theta} e^{j25^0} + e^{+j1,570796327 \sin \theta} e^{j50^0} + e^{+j4,71238898 \sin \theta} e^{j75^0})$$

$$E_{tot} = 4E_0(e^{-j4,71238898 \sin \theta} + e^{+j4,71238898 \sin \theta} e^{j75^0} + e^{-j1,570796327 \sin \theta} e^{j25^0} + e^{+j1,570796327 \sin \theta} e^{j50^0})$$

$$E_{tot} = 4E_0 e^{j37,5} (e^{-j4,71238898 \sin \theta} e^{-j37,5^0} + e^{+j4,71238898 \sin \theta} e^{j37,5^0} + e^{-j1,570796327 \sin \theta} e^{-j12,5^0} + e^{+j1,570796327 \sin \theta} e^{j12,5^0})$$

$$E_{tot} = 4E_0 e^{j37,5} [2 \cos(4,71238898 \sin \theta + 37,5^0) + 2 \cos(1,570796327 \sin \theta + 12,5^0)]$$

▪ Fasa 80⁰

$$E_{tot} = 4E_0(e^{-j4,71238898 \sin \theta} + e^{-j1,570796327 \sin \theta} e^{j80^0} + e^{+j1,570796327 \sin \theta} e^{j160^0} + e^{+j4,71238898 \sin \theta} e^{j240^0})$$

$$E_{tot} = 4E_0(e^{-j4,71238898 \sin \theta} + e^{+j4,71238898 \sin \theta} e^{j240^0} + e^{-j1,570796327 \sin \theta} e^{j80^0} + e^{+j1,570796327 \sin \theta} e^{j160^0})$$

$$E_{tot} = 4E_0 e^{j120} (e^{-j4,71238898 \sin \theta} e^{-j120} + e^{+j4,71238898 \sin \theta} e^{j120} + e^{-j1,570796327 \sin \theta} e^{-j40} + e^{+j1,570796327 \sin \theta} e^{j40})$$

$$E_{tot} = 4E_0 e^{j120} [2 \cos(4,71238898 \sin \theta + 120^0) + 2 \cos(1,570796327 \sin \theta + 40^0)]$$

4. Pengukuran antenna



(a)



(b)

Gambar 2 (a) Antena Tampak Depan (b) Antena Tampak Belakang

4.1 Perbandingan hasil pengukuran dengan simulasi

Tabel 1 Perbandingan Hasil Simulasi Awal, Optimasi Simulasi dan Realisasi

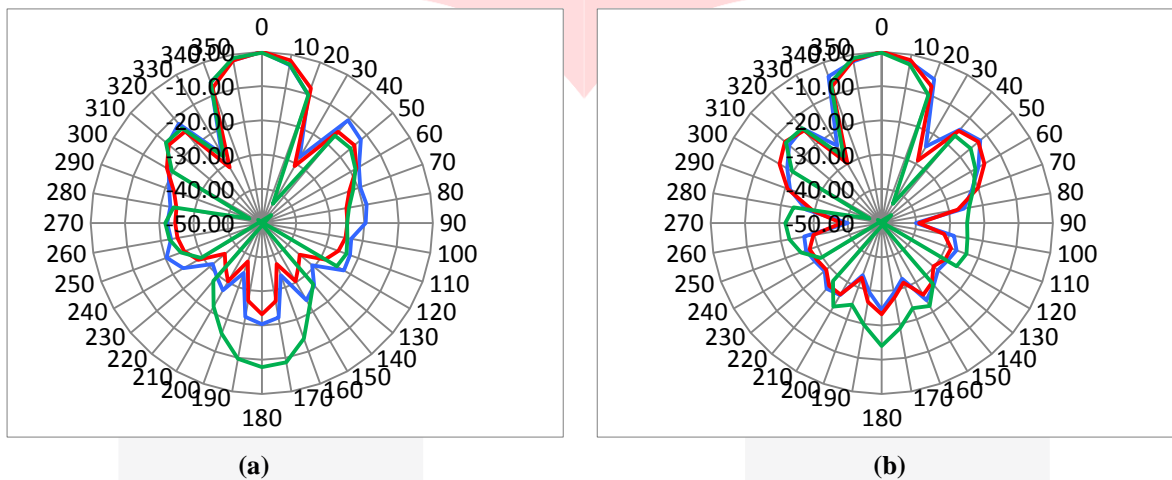
Parameter		Spesifikasi yang telah ditentukan	Spesifikasi simulasi	Realisasi
Frekuensi kerja		2,9 – 3,1 GHz	2,9 – 3,1 GHz	2,9 – 3,1 GHz
Frekuensi tengah		3GHz	3GHz	3GHz
VSWR	VSWR 1	≤1,5	1,0915	
	VSWR2	≤1,5	1,1805	
	VSWR 3	≤1,5	1,1814	
	VSWR 4	≤1,5	1,0874	

Parameter	Spesifikasi yang telah ditentukan	Spesifikasi simulasi	Realisasi
Frekuensi kerja	2,9 – 3,1 GHz	2,9 – 3,1 GHz	2,9 – 3,1 GHz
Frekuensi tengah	3GHz	3GHz	3GHz
VSWR	VSWR 5	≤1,5	1,0264
	VSWR 6	≤1,5	1,1189
	VSWR 7	≤1,5	1,1229
	VSWR 8	≤1,5	1,0203
	VSWR 9	≤1,5	1,0284
	VSWR 10	≤1,5	1,1243
	VSWR 11	≤1,5	1,1224
	VSWR 12	≤1,5	1,0212
	VSWR 13	≤1,5	1,0817
	VSWR 14	≤1,5	1,1724
	VSWR 15	≤1,5	1,1722
	VSWR 16	≤1,5	1,0637
Returnloss	S1.1	≤-14 dB	-23.043 dB
	S2.2	≤-14 dB	-21.933 dB
	S3.3	≤-14 dB	-21.569 dB
	S4.4	≤-14 dB	-22.716 dB
	S5.5	≤-14 dB	-19.775 dB
	S6.6	≤-14 dB	-18.347 dB
	S7.7	≤-14 dB	-18.284 dB
	S8.8	≤-14 dB	-19.631 dB
	S9.9	≤-14 dB	-20.598 dB
	S10.10	≤-14 dB	-19.219 dB
	S11.11	≤-14 dB	-18.997 dB
	S12.12	≤-14 dB	-20.096 dB
	S13.13	≤-14 dB	-21.596 dB
	S14.14	≤-14 dB	-20.68 dB
	S15.15	≤-14 dB	-20.987 dB
	S16.16	≤-14 dB	-22.107 dB
Impedansi	Port 1	50Ω	45.867-j0.707 Ω
	Port 2	50Ω	43.306-j3.874 Ω
	Port 3	50Ω	43.445-j4.187 Ω
	Port 4	50Ω	46.015-j0.533 Ω
	Port 5	50Ω	48.831-j0.544 Ω
	Port 6	50Ω	45.934-j3.537 Ω
	Port 7	50Ω	45.911-j3.76 Ω
	Port 8	50Ω	49.369-j0.776 Ω
	Port 9	50Ω	48.826-j0.731 Ω
	Port 10	50Ω	45.763-j3.675 Ω
	Port 11	50Ω	45.956-j3.782 Ω
	Port 12	50Ω	49.883-j1.042 Ω
	Port 13	50Ω	46.44-j1.282 Ω
	Port 14	50Ω	43.965-j4.394 Ω
	Port 15	50Ω	43.815-j4.142 Ω
	Port 16	50Ω	47.294-j1.296 Ω
Gain	≥10dB	13,98 dB	19,24 dB dB
Pola radiasi	Unidireksional	Unidireksional	Unidireksional

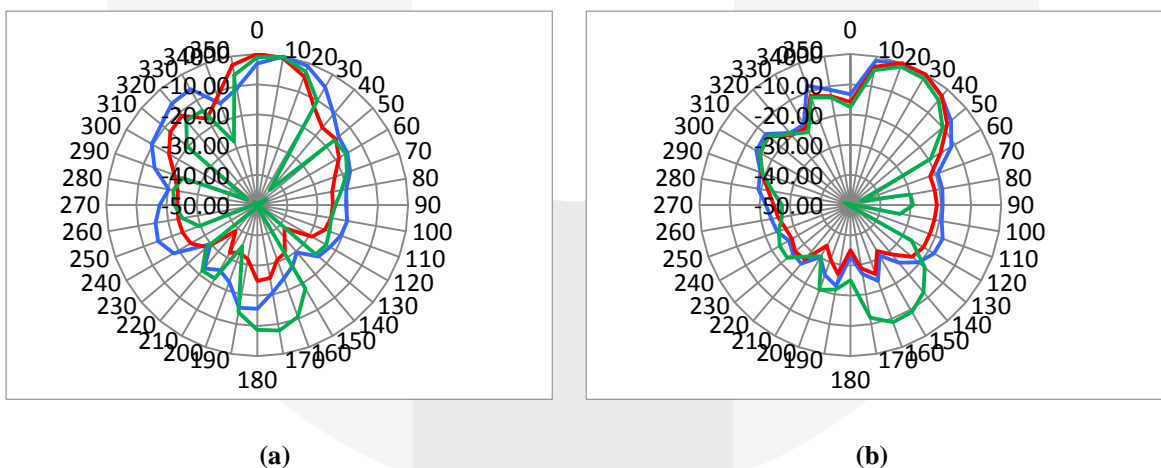
Parameter	Spesifikasi yang telah ditentukan	Spesifikasi simulasi	Realisasi
Frekuensi kerja	2,9 – 3,1 GHz	2,9 – 3,1 GHz	2,9 – 3,1 GHz
Frekuensi tengah	3GHz	3GHz	3GHz
Polarisasi	Sirkular	Sirkular	Sirkular

Tabel 2 Perbandingan Hasil Simulasi, Realisasi dan Perhitungan Menggunakan Phase Shifter

Beda fasa	Beam steering			Gain		
	Simulasi	Realisasi	Perhitungan	Simulasi	Realisasi	Perhitungan
25 ⁰	3 ⁰	10 ⁰	8 ⁰	13,25 dB	17,68 dB	14,939 dB
80 ⁰	24 ⁰	30 ⁰	26 ⁰	13,29 dB	18,636 dB	14,008 dB



Gambar 3 (a) Perbandingan Azimuth Antena Realisasi, Simulasi Teoritis (b) Perbandingan elevasi Antena Realisasi, Simulasi dan Teoritis



Gambar 4 Perbandingan Pola Radiasi Antena Realisasi, Simulasi dan Teoritis dengan beda fasa (a) 25⁰ dan (b) 80⁰

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dari seluruh proses perancangan dan realisasi antenna phased array 4x4 ini adalah sebagai berikut :

1. Semua parameter antenna yang ada yaitu VSWR, Bandwidth, Gain dan Pola Radiasi sudah memenuhi spesifikasi perancangan awal antenna dan hasilnya tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi.
2. Telah terjadi pergeseran fasa sebesar 10^0 untuk beda fasa 25^0 dan 30^0 untuk beda fasa 80^0 .
3. Pergeseran fasa dilakukan dengan menggunakan metode pergeseran fasa secara manual yaitu menggunakan perubahan fasa terhadap panjang dari kabel pencatu untuk setiap sudut yang digunakan.
4. Secara prinsip antenna ini sudah sesuai dengan kinerja antenna untuk radar 3 Dimensi, namun perlu diingat antenna ini hanya sebuah prototype yang masih perlu dikembangkan lebih lanjut

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Balanis, C.A. 1982. *Antena Theory : Analysis and Design*. Harper & Row Publisher Inc. New York.
- [2] D. K. Barton and S. A. Leonov, *Radar Technology Encyclopedia*, Boston London: Artech House. 1998.
- [3] Fatimah, Zillya. *Perancangan dan Realisasi Antenna Phased Array Mikrostrip 1x4 X-Band*. Telkom University. 2015
- [4] Fitri, Iskandar. *Antena mikrostrip patch segiempat untuk menghasilkan polarisasi circular dan wideband*. Telecommunication department, Faculty of Informatics and Communication Technology University of National, Jakarta. 2009
- [5] K. Hussein and M. S. Mahdi. *Design of Five Bit Digital Phase Shifter*. Universitas Departemen Teknik Laser dan Elektronik Optik. 2012.
- [6] Misbakhuddin, Muhammad. *Perancangan dan Realisasi Antena mikrostrip Patch Array 2x8 pada Frekuensi S-Band untuk Radar Pengawas Pantai*. Telkom University. 2013
- [7] Pratiwi, Aninditya Esti. *Perancangan Dan Realisasi Antena Mikrostrip Phased Array 8x4 Untuk Sistem Airport Surveillance Radar (ASR) S-Band*. Telkom University.
- [8] Skolnik, Merrill I. *Introduction to Radar System*. McGrawhill. 1980
- [9] Wahab, Mashury. Wahyu, Yuyu. Dkk. *Design and Development of Microstrip Planar Antenna for S-Band Radar*. MCEEI IEEE. 2012
- [10] Yosefariko. *Perancangan dan realisasi Antena Mikrostrip Dual Band menggunakan Slot berbentuk U untuk Aplikasi Wi-Fi*. Telkom University. 2015
- [11] *BAB II Antena Mikrostrip 2,1*. Diakses pada tanggal 17 April 2016. repository.usu.ac.id/bitstream/.../3/Chapter%20II.pdf [11] *Radar Basics*. Diakses pada 4 April 2016. <http://www.radartutorial.eu/02.basics/Air-Defense%20Radars.en.html>
- [12] *Antenna Arrays(Phased Array)*. Diakses pada 4 April 2016. <http://www.antenna-theory.com/arrays/main.php>
- [13] *Range Resolution*. Diakses pada 12 Juni 2017. <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Range%20Resolution.en.html>
- [14] *Automatic Gain Control Methods*. Diakses pada 12 Juni 2017. <http://www.radartutorial.eu/09.receivers/rx08.en.html>