

PENGGESER FASA MIKROSTRIP 90 DERAJAT UNTUK AIRPORT SURVEILLANCE RADAR (ASR) S-BAND

90 DEGREES MICROSTRIP PHASE SHIFTER FOR AIRPORT SURVEILLANCE RADAR
(ASR) S-BAND

Yustina Wahyu Andika¹, Levy Olivia Nur², Yuyu Wahyu³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹yustinandika@gmail.com, ²levy.olivia@telkomuniversity.ac.id, ³yuyu.wahyu@lipi.go.id

ABSTRAK

Pada penelitian ini dirancang sebuah *microstrip passive phase shifter* berbentuk *meander coupled-line* yang dapat di implementasikan untuk menggeser fasa sejauh 90° sehingga dapat memudahkan dalam sistem pengarahan antena.

Antena dirancang di atas substrat FR-4 dengan nilai permitivitas relatif 4.6 pada frekuensi S-Band (3 GHz), yaitu frekuensi yang digunakan pada *Airport Surveillance Radar* yang berfungsi untuk memantau pergerakan pesawat saat masuk, keluar atau hanya melintasi wilayah bandara tertentu. Metode yang digunakan adalah *Schiffman's phase shifter* sebagai acuan perancangan.

Pada jurnal ini, direalisasikan *microstrip passive phase shifter* dengan *return loss* untuk S_{11} sebesar -14.7 dB dan pada S_{22} sebesar -14.6 dB. Sedangkan nilai fasanya senilai 97.22° untuk S_{12} dan 92.56° untuk S_{21} .

Keyword: Mikrostrip, Passive phase shifter, Radar, S-Band

ABSTRACT

In this paper we designed a microstrip passive phase shifter with meander coupled-line shaped that can be implemented to shift the phase as far as 90° so it can ease in the antenna alignment system.

The antenna is designed on a FR-4 substrate with a relative permittivity value of 4.6 at the S-Band frequency (3 GHz), which is used on the Airport Surveillance Radar that serves to monitor the movement of the aircraft when entering, exiting or just crossing certain airport areas. The method used is Schiffman's phase shifter as a reference design.

In this journal, microstrip passive phase shifter is fabricated with return loss for S_{11} of -14.7 dB and -14.6 dB at S_{22} . While the value of the phase shift is 97.22° for S_{12} and 92.56° for S_{21} .

Keyword: Mikrostrip, Passive phase shifter, Radar, S-Band

I. Latar Belakang Masalah

Teknik *beam steering* pada perancangan antena saat ini sedang mendapatkan perhatian, terutama untuk komunikasi dan aplikasi radar. Hal ini berkaitan dengan meningkatnya penggunaan dari frekuensi radio (RF) yang menuntut terminalnya mampu untuk mengarahkan pancaran gelombang yang diradiasinya secara adaptif. Pada sistem radar, fitur pengarahan ini sangat dibutuhkan untuk menentukan arah dari target [1]. Bahkan, sistem radar yang modern seperti pada *Airport Surveillance Radar* (ASR) akan membutuhkan kontrol khusus untuk pengarahan pancaran gelombang dan direktivitas untuk meningkatkan kemampuan *coverage* dan *tracking* [2]. Teknik *beam steering* dapat dilakukan secara elektronik maupun mekanik. Namun, teknik mekanik membutuhkan sistem *positioning* fisik yang membutuhkan biaya yang besar, serta membutuhkan perhitungan yang presisi karena dijalankan secara manual.

Untuk mengatasinya, diperlukan suatu teknik pengarahan antena tanpa membutuhkan gerakan mekanik dari sistem antena. *Microwave phase shifter* merupakan salah satu komponen yang sudah banyak digunakan pada sistem *microwave circuit* seperti sistem *phased-array antenna*, sistem komunikasi *phase modulation* dan aplikasi-aplikasi industri lainnya.

Pada Jurnal ini akan dirancang suatu *passive phase shifter* untuk pergeseran fasa sebesar 90° pada *Airport Surveillance Radar* S-Band secara sederhana supaya mudah untuk difabrikasi dan ekonomis, tetapi tetap memiliki performansi yang baik. Jenis antena yang akan digunakan berupa mikrostrip dengan bahan FR-4 yang mudah didapatkan di pasaran [3]. Pergeseran fasa yang digunakan adalah 90° karena sudut ini dibutuhkan dan cukup sering digunakan dalam sistem pergeseran fasa radar. Selain itu, desain yang dihasilkan nanti dapat dijadikan acuan dasar untuk mendesain *phase shifter* dengan pergeseran sudut fasa lainnya.

II. Dasar Teori

2.1. Antena *Phased Array*

Antena *Phased Array* merupakan suatu sistem antena yang terdiri dari beberapa elemen yaitu elemen antena, *amplifier* dan *phase shifter* yang saling terhubung dan menggunakan variabel fasa atau pengontrolan *time delay* pada setiap elemen antenanya untuk memindai *beam*. Teknik *array* digunakan untuk menghasilkan *beam* yang dapat dipindai secara elektronik. Teknik *beam steering* dengan *phase shifter* pada antena *phased array* prinsipnya adalah pengarahannya tidak dilakukan dengan rotasi fisik untuk mengubah arah dari *beam*-nya, tetapi *beam steering* dicapai dengan mengubah amplitudo dan fasa dari sinyal pada masing-masing elemen. Pada sistem *phased array*, nilai fasa relatif dari elemen-elemennya diubah dengan cara tertentu, salah satunya dengan penggunaan *phase shifter* sehingga *main beam* pada pola radiasinya menunjukkan arah yang ditargetkan [4].

2.2. *Airport Surveillance Radar (ASR)*

Airport Surveillance Radar (ASR) atau radar pengawas udara merupakan radar yang digunakan untuk memantau pergerakan pesawat komersial pada saat memasuki/keluar wilayah bandara tertentu atau hanya melintasi suatu wilayah udara bandara. ASR terdiri dari dua bagian, yaitu primer dan sekunder. Bagian primernya bekerja pada frekuensi S-Band, sedangkan bagian sekundernya bekerja pada frekuensi L-Band.

Menurut *Federal Aviation Administration* (Departemen Transportasi Amerika Serikat), teknologi yang saat ini sedang digunakan dan dikembangkan adalah ASR-11, yang menggantikan teknologi ASR sebelumnya. Pada ASR-11 diterapkan *six level national weather service* dan *weather capability* yang mampu menciptakan level kewaspadaan dan kesadaran yang lebih tinggi untuk masing-masing pilot dan *controllers* ketika pesawat melintasi wilayah bandara. Perancangan desain *phase shifter* dilakukan berdasarkan spesifikasi ASR untuk menentukan setiap parameter dan dimensi yang ditargetkan. Frekuensi yang digunakan untuk merancang *phase shifter* adalah frekuensi antena primer dari ASR yang bekerja pada frekuensi S-Band.

2.3. Frekuensi S-Band

S-Band merupakan salah satu bagian dari pita gelombang mikro spektrum elektromagnetik yang didefinisikan oleh standar IEEE untuk gelombang radio dengan frekuensi yang berkisar antara 2 sampai 4 GHz, melintasi batas konvensional antara UHF dan SHF pada 3,0 GHz. S-Band digunakan oleh radar cuaca, radar kapal permukaan, dan beberapa satelit komunikasi, terutama yang digunakan oleh NASA untuk berkomunikasi dengan *Space Shuttle* dan Stasiun Antariksa Internasional [2].

2.4. Phase Shifter

Phase shifter merupakan suatu alat yang mampu menggeser suatu fasa gelombang elektromagnetik dengan frekuensi tertentu ketika merambat melalui saluran transmisi. Dalam berbagai bidang elektronik, *phase shifter* digunakan untuk mengubah fasa sinyal.

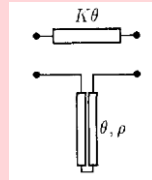
Aplikasi *phase shifter* biasanya digunakan pada diskriminator fasa, jaringan *beam forming*, *power divider*, linearisasi *power amplifier*, dan antena *phased array* [5]. Secara umum, *phase shifter* memiliki dua *port*, yaitu input dan output dengan parameter hamburan ideal ditunjukkan pada Persamaan (2.1).

$$S = \begin{pmatrix} 0 & e^{j\theta} \\ e^{j\theta} & 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Nilai θ menunjukkan respon fasa yang dapat diatur oleh *input* instruksi yang diberikan. *Phase shifter* bersifat analog jika dikontrol oleh tegangan atau arus yang kontinu dan menghasilkan respon fasa yang kontinu. Sedangkan, *phase shifter* digital dikontrol oleh tegangan atau arus diskrit dan menghasilkan respon fasa diskrit pada nilai tertentu.

2.5. Schiffman Phase Shifter

Pada tahun 1958 Bernard Schiffman mempublikasikan untuk pertama kalinya suatu *phase shifter* menggunakan *wavelength coupler* $\lambda/4$ yang menghasilkan respons *flat wideband* dari pergeseran fasa. *Schiffman phase shifter* terdiri dari sebuah *coupled section* dan *uniform transmission line* yang berfungsi untuk menghasilkan pergeseran fasa [6]. Pemilihan panjang lintasan dan derajat kopling yang tepat, maka dapat dihasilkan pergeseran fasa yang konstan pada suatu bandwidth yang lebar.



Gambar 2.1 Desain Standard Schiffman Phase Shifter

2.6. Meander-line Phase Shifter

Bagian dari *coupled-line* pada struktur *meander* akan dibagi menjadi dua atau lebih, dengan nilai *electrical length* yang sama, tetapi dengan nilai impedansi karakteristik yang berbeda.

Untuk pendekatan perhitungan *phase shifter* 90° dengan dua bagian ($n=2$), masing-masing bagian diberikan nilai panjang mendekati 45° pada frekuensi tengah. Acuan yang digunakan adalah *meander* ideal yang memiliki nilai *electrical length* (θ_i) yang sama untuk mode ganjil dan genapnya, sehingga dapat dinyatakan oleh persamaan 2.2 [8].

$$Z_{ei} = -jZ_e \cot \theta_i \text{ (genap)} \quad (2.2)$$

$$Z_{oi} = jZ_o \tan \theta_i \text{ (ganjil)} \quad (2.3)$$

Nilai θ_i didapatkan dari rata-rata aritmatik θ_e dan θ_o .

$$\theta_i = \frac{\theta_e + \theta_o}{2} \quad (2.4)$$

Pada frekuensi tengah, diasumsikan bahwa $\theta_e = \theta_{ec}$ dan $\theta_o = \theta_{oc}$, serta $\theta_i = 90^\circ$, sehingga

$$90^\circ = \frac{\theta_e + \theta_o}{2} \quad (2.5)$$

Maka, didapatkan rasio

$$\frac{\theta_e}{\theta_o} = \frac{\theta_{ec}}{\theta_{oc}} \quad (2.6)$$

Sedangkan formulasi untuk menentukan nilai impedansi input untuk *meander* dua bagian ($n=2$) adalah sebagai berikut.

$$Z_{e1} = \frac{1 + \alpha_{e1}}{\beta_{e1}}, \quad Z_{e2} = \alpha_{e1} \times Z_{e1} \quad (2.7)$$

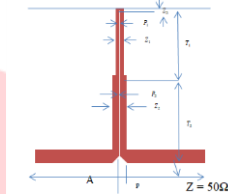
$$Y_{o1} = \frac{1 + \alpha_{o1}}{\beta_{o1}}, \quad Y_{o2} = \alpha_{o1} \times Y_{o1} \quad (2.8)$$

Untuk menentukan nilai α_{e1} , β_{e1} , α_{o1} dan β_{o1} digunakan pendekatan berikut.

$$\alpha_{e1} = \tan^2 \frac{\theta_{ec}}{2}, \quad \beta_{e1} = \frac{\theta_{ec}}{90^\circ} \cos^{-2} \frac{\theta_{ec}}{2} \text{ (genap)} \quad (2.9)$$

$$\alpha_{o1} = \tan^2 \frac{\theta_{oc}}{2}, \quad \beta_{o1} = \frac{\theta_{oc}}{90^\circ} \cos^{-2} \frac{\theta_{oc}}{2} \text{ (ganjil)} \quad (2.10)$$

Formulasi dan desain *stepped impedance* ini diharapkan dapat menghasilkan keluaran yang *matching* saat diterapkan.



Gambar 2.2 Stepped Impedance Meander Line Microstrip Phase Shifter

Formulasi dan desain *stepped impedance* ini diharapkan dapat menghasilkan keluaran yang *matching* saat diterapkan. Perhitungan untuk menentukan dimensi *phase shifter* dilakukan dengan metode perbandingan dari referensi yang sudah ada [7] sehingga menghasilkan persamaan berikut.

$$\text{Dimensi akhir} = \frac{f_{ref}}{f} \sqrt{\frac{\epsilon_{rref}}{\epsilon_r}} \times d_{ref} \quad (2.11)$$

dimana d_{ref} merupakan dimensi dari referensi yang sudah ada.

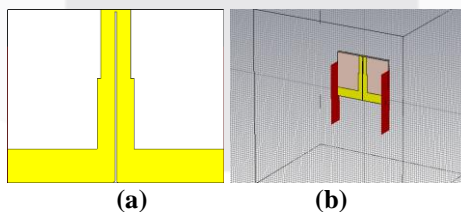
III. Perancangan dan Realisasi

3.1. Diagram Alir proses Realisasi *Phase Shifter*



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Perancangan dan Realisasi *Microstrip Phase Shifter*

3.2. Perancangan Antena Berdasarkan Perhitungan



Gambar 3.2 Gambar Prototipe *Phase Shifter* (a) Tampak Depan dan (b) Tampak Keseluruhan

Tabel 3.1 Dimensi Perhitungan

No.	Parameter	Nilai (mm)	Nilai optimasi (mm)
1.	A	25	20
2.	P	0.2	0.2
3.	P_1	0.055	0.205
4.	P_2	0.05	0.252
5.	T_1	7.281	6.55
6.	T_2	7.19	5.05
7.	Z_0	2.74	2.79
8.	Z_1	2.45	3.65
9.	Z_2	1.66	2.66
10.	Z_3	0.27	0.22

3.3. Perancangan Antena Pada CST

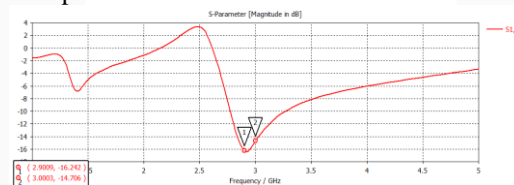
Hasil perhitungan di atas digunakan sebagai patokan awal dalam memulai tahapan simulasi. Simulasi disini bertujuan untuk mendapatkan data performansi *phase shifter* dan juga sebagai media koreksi atau optimasi sehingga didapatkan hasil yang terbaik yang sesuai dengan spesifikasi awal.

3.3.1. Simulasi dan optimasi

Hasil perhitungan yang didapatkan disimulasikan menggunakan software CST sebagai dasar awal pembuatan desain untuk melihat performansi *phase shifter*. Untuk mendapat antena yang sesuai dengan spesifikasi awal dilakukan beberapa kali optimasi hingga memperoleh ukuran yang tepat. Hasil simulasi yang ditunjukkan oleh simulasi berdasarkan perhitungan menunjukkan nilai *Return Loss* pada frekuensi S-Band yang belum memenuhi spesifikasi yang ditentukan, sehingga perlu dilakukan optimasi pada nilai dimensi *phase shifter* untuk mendapatkan hasil yang diharapkan.

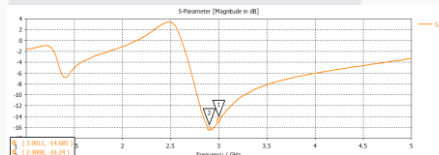
Pada percobaan sebelumnya, ukuran dimensi p_1 dan p_2 yang merepresentasikan perpotongan antara *coupled line* sangatlah kecil, yaitu pada 0.05 dan 0.055 mm, sehingga proses fabrikasinya cukup sulit. Oleh sebab itu, dilakukan optimasi untuk menyesuaikan ukuran dimensi agar mengurangi tingkat kesulitan dalam proses fabrikasinya. Berikut ini merupakan hasil simulasi berdasarkan dimensi akhir setelah dilakukan beberapa kali optimasi sesuai Tabel 3.1.

Berikut hasil simulasi setelah di optimasi kembali :



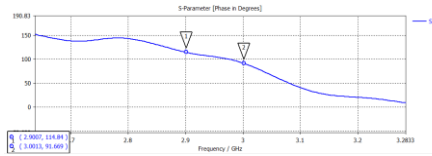
Gambar 3.3 Return Loss S_{11} Setelah Optimasi

Setelah dioptimasi, grafik S_{11} untuk nilai *Return Loss* yang dihasilkan oleh dimensi yang tertera pada Tabel 3.2 menunjukkan angka yang telah memenuhi kriteria, yaitu pada -16.2 dB pada frekuensi 2.9 GHz dan -14.7 dB pada frekuensi 3 GHz.



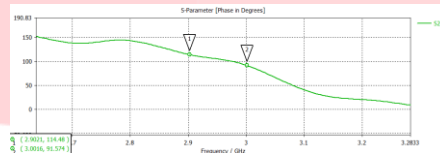
Gambar 3.4 Return Loss S_{22} Setelah Optimasi

Grafik S_{22} untuk nilai *Return Loss* yang dihasilkan oleh dimensi yang tertera pada Tabel 3.4 menunjukkan angka yang telah memenuhi kriteria, yaitu pada -16.2 dB pada frekuensi 2.9 GHz dan -14.6 dB pada frekuensi 3 GHz.



Gambar 3.5 Fasa S_{12} Setelah Optimasi

Gambar 3.7 menunjukkan nilai respon pergeseran fasa pada grafik S_{12} yang terjadi pada *ouput port* dengan *phase shifter* 90° pada frekuensi 2.9 GHz dan 3 GHz. Grafik yang dihasilkan sudah cukup *flat* dan jarak pergeseran dari 2.9 Ghz ke 3 GHz berhasil dipersempit.



Gambar 3.6 Fasa S_{21} Setelah Optimasi

Gambar 3.9 menunjukkan nilai respon pergeseran fasa pada grafik S_{21} yang terjadi pada *ouput port* dengan *phase shifter* 90° pada frekuensi 2.9 GHz dan 3 GHz. Grafik yang dihasilkan sudah cukup *flat* dan jarak pergeseran dari 2.9 Ghz ke 3 GHz berhasil dipersempit.

3.4. Pemodelan Prototipe Antena

Setelah dilakukan simulasi untuk mendapatkan hasil parameter yang sesuai spesifikasi, maka prototipe *phase shifter* mikrostrip difabrikasi sesuai dengan ukuran simulasi yang telah dirancang.

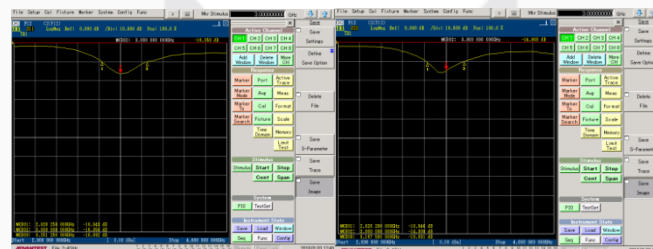


Gambar 3. 7 Pemodelan Prototipe Antena yang Direalisasikan

IV. Pengukuran dan Analisis

4.1 Analisis Hasil Pengukuran *Return Loss*

Berikut merupakan hasil pengukuran *return loss* S_{11} dan S_{22} .



(a)

(b)

Gambar 4.2 Pengukuran *Return Loss* S_{11} dan S_{22}

Berdasarkan Gambar 4.2(a), nilai *return loss* S_{11} sudah memenuhi spesifikasi yang diharapkan (≤ -10 dB) yaitu pada nilai -16.358 dB. *Range* frekuensi nilai *return loss* dengan nilai ≤ -10 dB ada pada 2,8 – 3,1 GHz.

Berdasarkan Gambar 4.2(b), nilai *return loss* S_{22} sudah memenuhi spesifikasi yang diharapkan (≤ -10 dB) yaitu pada nilai -14.908 dB. *Range* frekuensi nilai *return loss* dengan nilai ≤ -10 dB ada pada 2,8 – 3,1 GHz.

4.2 Analisis Hasil Pengukuran Fasa



Gambar 4.3 Pengukuran Fasa S_{12} dan Fasa S_{21}

Berdasarkan Gambar 4.3(a) dan 4.3(b), nilai fasa S_{12} pada frekuensi 3 GHz adalah 97.22° . Sedangkan, pada frekuensi 2.8 adalah sebesar 146.64° dan pada frekuensi 3.1 adalah sebesar 26.3° . Sedangkan untuk S_{21} nilai fasanya adalah 92.56° pada 3 GHz, 151.18° pada 2.8 GHz dan 30.38° untuk frekuensi 3.1 GHz. Grafik fasa yang dihasilkan menunjukkan garis yang belum terlalu *flat*, tetapi untuk frekuensi S-Band (3 GHz) nilainya sudah cukup mendekati.

4.3 Impedansi Phase Shifter



Gambar 4.6 Pengukuran Impedansi (a) Z_{11} dan (b) Z_{22}

Nilai impedansi untuk Z_{11} adalah 50.924Ω , sehingga telah sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Sedangkan pada Gambar 4.6(b) terlihat bahwa nilai impedansi Z_{22} adalah 39.85Ω , sehingga memungkinkan masih terdapatnya fenomena tidak *matching* tetapi masih pada nilai yang mendekati impedansi yang diharapkan.

4.4 Analisis Perbandingan Hasil Pengukuran

Berikut ini merupakan tabel perbandingan hasil simulasi perancangan *phase shifter* menggunakan *software* CST dan pengukuran berdasarkan fabrikasi.

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Pengukuran

Parameter	Simulasi	Pengukuran
<i>Range</i> frekuensi pada nilai <i>return loss</i> ≤ 10 dB	2.9 – 3 GHz	2.8 – 3.1 GHz
Impedansi masukan	50Ω	50.924Ω dan 39.858Ω
Pergeseran fasa pada S_{12}	90°	97.22°
Pergeseran fasa pada S_{21}	90°	92.56°

Berdasarkan tabel dan gambar-gambar hasil pengukuran terlihat bahwa beberapa parameter telah memenuhi spesifikasi, seperti *return loss* dan impedansi. Tetapi, nilai pergeseran fasa hanya mampu mencapai level mendekati, belum sesuai secara sempurna. Hal ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, diantaranya adalah kesalahan pada saat fabrikasi maupun saat pengukuran karena ukuran *phase shifter*

yang difabrikasi cukup kecil dan sifatnya sensitif terhadap perubahan ukuran dimensinya, sehingga dibutuhkan tingkat ketelitian yang tinggi pada saat proses fabrikasi maupun pengukuran.

Ketidaktepatan yang terjadi akibat proses fabrikasi dapat memberikan pengaruh terhadap parameter-parameter yang ditargetkan, antara lain tidak *matching*-nya saluran transmisi yang direpresentasikan oleh nilai impedansi yang lebih rendah dari target yang diharapkan mempengaruhi kualitas nilai *return loss* dan pergeseran frekuensi kerja, sedangkan *gap* yang kurang presisi sangat menjadikan pergeseran fasa menjadi kurang tepat sasaran. Pada implementasinya pada *Airport Surveillance Radar*, hal ini akan berpengaruh terhadap sudut pengarahannya, karena kemungkinan nilai *phase error*-nya menjadi lebih tinggi, sehingga ada kemungkinan pengarahannya menjadi kurang tepat sasaran pada saat akan mengarahkan pada target pesawat yang melintas pada wilayah bandara.

V. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari seluruh proses perancangan dan realisasi *microstrip passive phase shifter* adalah sebagai berikut :

- Berdasarkan hasil perancangan melalui simulasi software, *passive phase shifter* mampu bekerja pada range frekuensi 2.9 – 3 GHz dengan nilai *return loss* -14.7 dB untuk S_{11} dan -14.6 dB untuk S_{22} . Sedangkan nilai pergeseran fasanya bernilai 91° untuk masing-masing parameter S_{12} dan S_{21} .
- Passive phase shifter* yang telah difabrikasi mampu bekerja pada range frekuensi 2.8-3.1 GHz dengan nilai *return loss* S_{11} sebesar -16.35 dB, pada S_{22} sebesar -14.908 dB. Sedangkan nilai fasanya senilai 97.22° untuk S_{12} dan 92.56° untuk S_{21} . Dengan demikian, rancangan telah mendekati kebutuhan dan sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan, yaitu nilai *return loss* ≤ -10 dB dan pergeseran fasa mendekati 90° .

5.2. Saran

Untuk mendapat performansi antenna yang lebih baik, maka beberapa hal yang menjadi saran untuk penelitian selanjutnya untuk perancangan *phase shifter*, antara lain :

- Pemilihan bahan untuk substrat antenna sebaiknya lebih diperhatikan dan disesuaikan. Bahan FR-4 yang digunakan dalam Jurnal ini bisa diganti dengan bahan lain yang memungkinkan sebagai penyusun *passive phase shifter*.
- Microstrip passive phase shifter* pada fasa 90° masih dapat dikembangkan dengan berbagai metode dan dengan bentuk desain yang berbeda.

REFERENSI

- [1] Skolnik, M. *Radar Handbook 2nd Edition*. Boston: Artech House. 2005
- [2] Lestari, A., & dkk. Indera Ms-1 : Radar S-Band Pertama Karya Anak Bangsa. Jakarta. November 2012
- [3] Rachmansyah, Irianto, A., & A., B. M.a. Designing and Manufacturing Microstrip Antenna for Wireless Communication at 2.4 GHz. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol.3, No.5. 2011
- [4] Rabinovich, V., & Alexandrov, N. Antenna Arrays and Automotive Applications. *Springer*, (hal. Chapter 2 : Typical Array Geometries and Basic Beam Steering Methods). 2013
- [5] Rosu, I. (t.thn.). Phase Shifters. *YO3DAC / VA3IUL*. <http://www.qsl.net/va3iul>.
- [6] B.M.Schiffman. A New Class of Broad-Band Microwave 90-Degree Phase Shifters. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, (hal. 232-237). 1958
- [7] Z.Zhang, Y.-C. S.-F.-M.-S. Modified Broadband Schiffman Phase Shifter using Dentate Microstrip and Patterned Ground Plane. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol.24, (hal. 9-16). 2011
- [8] Schiek, B., & Kohler, J. A Method for Broad-Band Matching of Microstrip Differential Phase Shifters. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol.MTT-25;No.8. 1977