

ANTENA *POLARIZATION-RECONFIGURABLE* DENGAN RANGKAIAN PENCATU *HYBRID COUPLER*

POLARIZATION-RECONFIGURABLE ANTENNA WITH HYBRID COUPLER FEEDING CIRCUIT

Ashfa Samial Hamda¹, Aloysius Adya Pramudita², Yuyu Wahyu³

^{1,2} Universitas Telkom, Bandung

³ Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

¹ashfash@student.telkomuniversity.ac.id, ²pramuditaadya@telkomuniversity.co.id,

³yuyuwahyusr@gmail.com

Abstrak

Antena *reconfigurable* polarisasi merupakan antenna yang dapat menerima berbagai polarisasi. Hal tersebut sangatlah menguntungkan karena pada saat gelombang dipancarkan dimungkinkan terjadinya perubahan polarisasi atau depolarisasi akibat keadaan yang ada di alam. Pada penelitian kali ini dirancang antenna mikrostrip *patch* sirkular dengan menggunakan *90° hybrid coupler*. Untuk mengubah polarisasinya digunakan *switch* pada setiap *output* dari *hybrid coupler*. Dengan polarisasi yang dihasilkan dari antenna yang dirancang yaitu polarisasi linier vertikal, polarisasi linier horizontal, *right hand circular polarization*, dan *left hand circular polarization*. Dengan frekuensi 3,5 GHz – 3,6 GHz yang merupakan salah satu rentang frekuensi pada 5G band n78 yang rentang frekuensinya 3,3 GHz – 3,8 GHz. Dari hasil simulasi seluruh konfigurasi polarisasi yaitu menghasilkan nilai yang sesuai dengan spesifikasi antenna yaitu *return loss* ≤ -10 dB. Serta nilai *axial ratio* saat simulasi untuk RHCP 2,54 dB, LHCP 2,73 dB, dan untuk kedua polarisasi linier 40 dB. Sedangkan untuk realisasi antenanya *return loss* ≤ -10 dB tidak seluruh rentang frekuensi untuk setiap konfigurasi polarisasi. Dan pada pengukuran *axial ratio* antenna yang didapatkan ialah RHCP 3,64 dB, LHCP 3,14 dB, polarisasi linier vertikal 26,24 dB, dan polarisasi linier horizontal 29,82 dB.

Kata kunci : *scattering, diffraction, polarization reconfigurable antenna, microstrip antenna, hybrid coupler*

Abstract

A polarization reconfigurable antenna is an antenna that can achieve polarization diversity. That condition is very advantageous because when the wave is transmitted the depolarization can be happened because nature condition. A microstrip antenna has been developed in this research with a circular patch and *90° hybrid coupler*. For changing the polarization, the antenna used a switch on the hybrid coupler. The polarization achieved from the antenna are right-hand circular polarization, left-hand circular polarization, vertically linear polarization, and horizontally linear polarization. With the frequency 3,5 GHz - 3,6 GHz, this frequency is one of frequency 5G band n78 which is 3,3 GHz - 3,8 GHz. From the simulation result, all of the polarization configurations achieved is match with the antenna specification which is the values of *return loss* ≤ -10 dB. The axial ratio values in the simulation result for each polarization are RHCP 2,54 dB, LHCP 2,73 dB, and for both linear polarization 40 dB. But for the realization of the antenna not all of the frequency achieved *return loss* ≤ -10 dB. And the measurement of the realization antenna *axial ratio* for each polarization are RHCP 3,64 dB, LHCP 3,14 dB, vertically linear polarization 26,24 dB, and horizontally linear polarization 29,82 dB.

Keywords: *scattering, diffraction, polarization reconfigurable antenna, microstrip antenna, hybrid coupler*

1. Pendahuluan [10 pts/Bold]

Pada pengembangan 5G salah satunya antenna yang merupakan struktur antara *guiding device* dengan ruang bebas [1]. Salah satu permasalahan pada antenna ialah depolarisasi akibat *scattering*

[2] ataupun difraksi [3] yang dapat menyebabkan daya yang diterima oleh antenna penerima tidak maksimal [1]. Oleh karena itu antenna *reconfigurable* polarisasi yang dapat menerima berbagai polarisasi dirancang [4]. Pada aplikasinya salah satu teknik perubahan polarisasi dari antenna *reconfigurable* polarisasi dengan *switch* [5] salah satunya dengan dioda PIN [6]. Selain menggunakan *switch* untuk mengatur konfigurasi yang diinginkan penggunaan *hybrid coupler* juga dapat mengatur parameter yang kita inginkan. *Hybrid coupler* merupakan salah satu *directional coupler* yang dapat membuat output dari rangkaian ini memiliki perbedaan fasa [7]. Pada [8] penggunaan *hybrid coupler* menyebabkan dua buah polarisasi yaitu *right hand circular polarization* (RHCP) dan *left hand circular polarization* (LHCP). *Hybrid coupler* pada [11] terdapat dua output serta dua input. Kedua output memiliki perbedaan 90° yang dapat membuat perubahan polarisasi.

Pada Tugas Akhir ini akan melakukan perancangan dan realisasi pada antenna *reconfigurable* yang dapat mengubah polarisasi dari antenna tersebut pada frekuensi 3,5 GHz – 3,6 GHz. Dengan teknik yang digunakan ialah secara elektrik dengan menggunakan komponen *switch* dalam kondisi *open circuit* dan *close circuit*. Pada simulasi *switch* dilakukan dengan dua kondisi. Kondisi pertama dengan *switch* sempurna yaitu dengan memutus serta menyambungkan rangkaian mikrostrip. Kondisi kedua dengan *switch* tidak sempurna yaitu dengan memutus serta menyambungkan dengan menggunakan kabel tembaga. Sedangkan saat pengukuran *switch* untuk memutus serta menyambungkan rangkaian menggunakan *copper tape*. Selain itu pemakaian *hybrid coupler* juga dirancang untuk menghasilkan polarisasi yang berbeda-beda. Polarisasi yang dapat dicapai pada antenna ini ialah polarisasi linier vertikal, linier horizontal, *right hand circular polarization*, *left hand circular polarization*.

2. Dasar Teori

2.1 Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip memiliki tiga bagian yaitu *patch*, *ground plane*, dan *substrate* [2]. Terdapat berbagai bentuk *patch* seperti *square*, *rectangular*, *circular*, *dipole*, *circular ring*, *elliptical*, *triangular*, dan berbagai bentuk yang disesuaikan dengan kebutuhan [2].



Gambar 1. Antena Mikrostrip

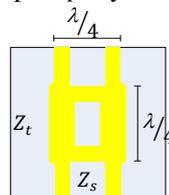
Dalam perancangan kali ini yaitu dengan menggunakan *patch* sirkular maka radius (a) dari *patch* perlu dihitung. Namun sebelumnya per ditentukan frekuensi (f_r), tinggi substrat (h) dan konstanta dielektrik dari substrat (ϵ_r) [2].

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

2.2 Hybrid Coupler

Hybrid Coupler merupakan salah satu *directional coupler* yang memiliki empat port. Keempat port terdiri dari dua *input* serta dua *output*. Pada kedua *output* dari *hybrid coupler* akan memiliki fasa yang berbeda. Salah satu contohnya 90° *hybrid coupler* atau sering disebut juga *branch-line hybrid coupler* merupakan *directional coupler* dengan *output* yang terbagi 3 dB serta akan memiliki fasa yang berbeda dari setiap *output* yaitu sebesar 90°.



Gambar 2. 90° Hybrid Coupler

Pada 90° hybrid coupler untuk mendapatkan besar yang diinginkan dengan setiap output terbagi sebesar 3 dB maka panjang dari setiap microstrip line harus sebesar $\lambda/4$ perlu ditentukan besar Z_s dan Z_t berdasarkan besar impedansi Z_0 dari microstrip line yang diinginkan [21]. Panjang microstrip line yang menghubungkan kedua output $\lambda/4$ menyebabkan fasa yang terjadi pada kedua output berdeda 90°.

$$Z_s = Z_0 \quad (3)$$

$$Z_t = \frac{Z_0}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$\theta = \beta l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (5)$$

Perbedaan fasa 90° dari kedua output dapat dilihat dari Parameter S dari 90° hybrid coupler. Untuk persamaan S-Parameter dari 90° hybrid coupler sebagai berikut :

$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Dari persamaan 6 kita dapat melihat bahawa saat port 1 menjadi input lalu pada port 2 fasa akan bergeser -90° dan pada port 3 fasa akan bergeser -180°. Artinya pada port 2 dan port 3 terjadi perbedaan fasa sebesar 90°. Untuk mendesain hybrid coupler diperlukan perhitungan untuk panjang gelombang (λ) serta lebar (W) dari microstrip line. Untuk menghitung panjang microstrip line perlu diketahui konstanta dielektrik efektif (ϵ_{reff}).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{f \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (8)$$

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & , \frac{W}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[\frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right\} \right] & , \frac{W}{h} > 2 \end{cases} \quad (9)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (10)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

3. Pembahasan

3.1 Desain Antena

Untuk merancang sebuah sistem antena dibutuhkan target spesifikasi dari antena yang diinginkan. Tujuannya ialah agar sesuai dengan fungsi dari antena tersebut. Maka pada tabel 3.2 akan menunjukkan spesifikasi dari sistem antena yang akan dirancang.

Tabel 1. Spesifikasi Antena

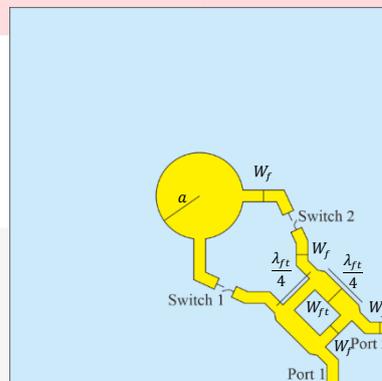
Parameter	Nilai
Jenis Patch	Sirkular
Substrat	FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$)
Tebal Substrat	1,6 mm
Frekuensi	3,5 GHz – 3,6 GHz
Polarisasi	Linier Vertikal, Linier

	Horizontal, RHCP, dan LHCP
<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB
<i>Axial Ratio</i> Polarisasi Linier	≥ 40 dB
<i>Axial Ratio</i> Polarisasi Sirkular	< 3 dB

Setelah spesifikasi ditentukan maka parameter dari antenna perlu dikalkulasi. Dan setelah dikalkulasi perlu dioptimasi agar sesuai dengan spesifikasi antenna yang diinginkan. Untuk desain dari antenna dapat dilihat pada gambar 3.

Tabel 2. Hasil Paramater Setelah Optimasi

No.	Parameter	Nilai (mm)	Keterangan
1	a	11,469	Jari-jari patch sirkular
2	W_f	3,112	Lebar <i>microstrip line</i> untuk $Z_s = 50 \Omega$
3	W_{ft}	5,302	Lebar <i>microstrip line</i> untuk $Z_t = 50/\sqrt{2} \Omega$
4	λ_f	51,838	Panjang gelombang untuk $Z_s = 50 \Omega$
5	λ_{ft}	50,677	Panjang gelombang untuk $Z_t = 50/\sqrt{2} \Omega$



Gambar 3. Desain Antena

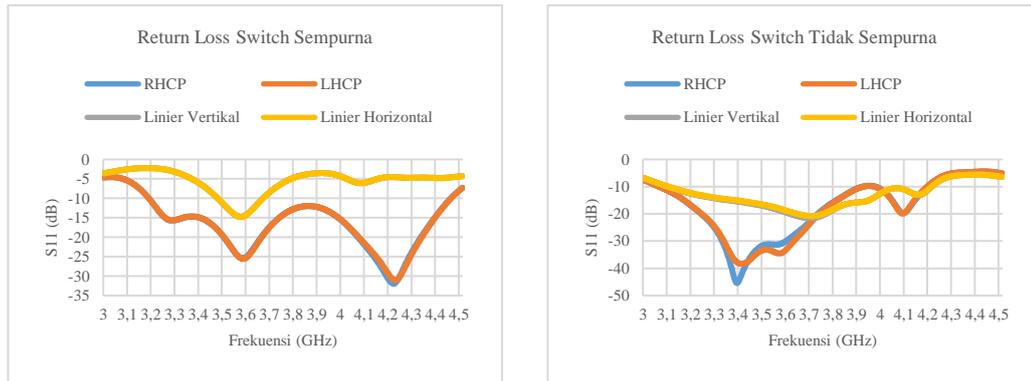
Dalam konfigurasi polarisasi yang ditargetkan sesuai dengan spesifikasi perubahannya tergantung dengan *switch* dan *port* yang digunakan.

Tabel 3. Hasil Polarisasi

<i>Input Port</i>	<i>Switch 1</i>	<i>Switch 2</i>	Polarisasi
1	ON	OFF	Linier Vertikal
1	ON	ON	RHCP
2	ON	ON	LHCP
2	OFF	ON	Linier Horizontal

3.2 Hasil Simulasi

Dalam kondisi simulasi pertama *switch* yang dilakukan ialah dengan kondisi *open circuit* dan *close circuit* dalam kondisi sempurna. Kondisi tersebut ialah dengan memutus rangkaian secara utuh. Dalam kondisi simulasi kedua *switch* yang dilakukan ialah dengan memutus dan menyambungkan rangkaian dengan kabel tembaga. Pemutusan dan penyambungan rangkaian untuk seluruh kondisi disesuaikan dengan tabel 3. Dalam simulasi dua hal yang diperhatikan yaitu *return loss* dan *axial ratio* yang sesuai pada tabel 1. Untuk kondisi seluruh konfigurasi polarisasi pada kedua kondisi simulasi menghasilkan *return loss* ≤ -10 dB untuk seluruh rentang frekuensi 3,5 GHz – 3,6 GHz.

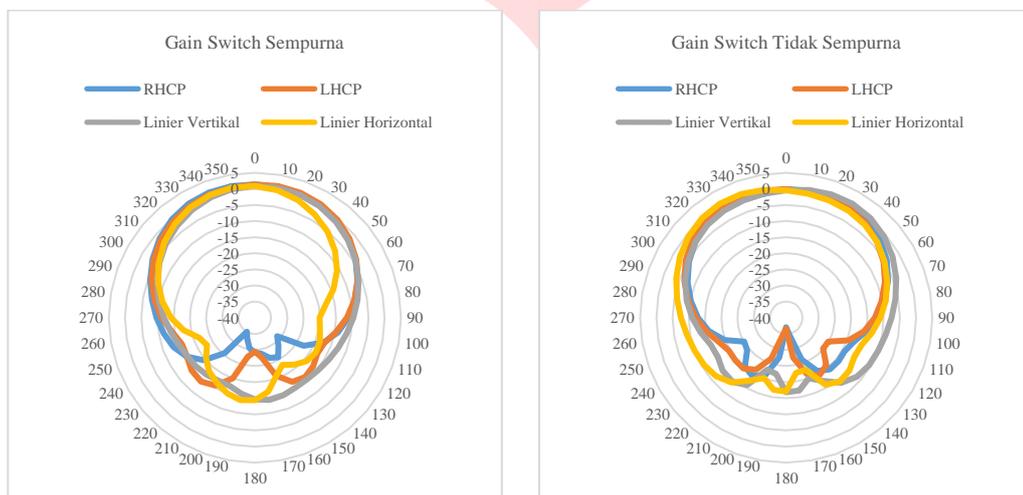


(a) Simulasi Kondisi Pertama

(b) Simulasi Kondisi Kedua

Gambar 4. Hasil Simulasi *Return Loss* Antena

Setelah mengetahui hasil *return loss* dari antenna selanjutnya data yang selanjutnya dibutuhkan ialah *axial ratio* dari antenna. Namun untuk mengetahui *axial ratio* diperlukan mengetahui arah dari *gain* terbesar dari antenna.



(a) Simulasi Kondisi Pertama

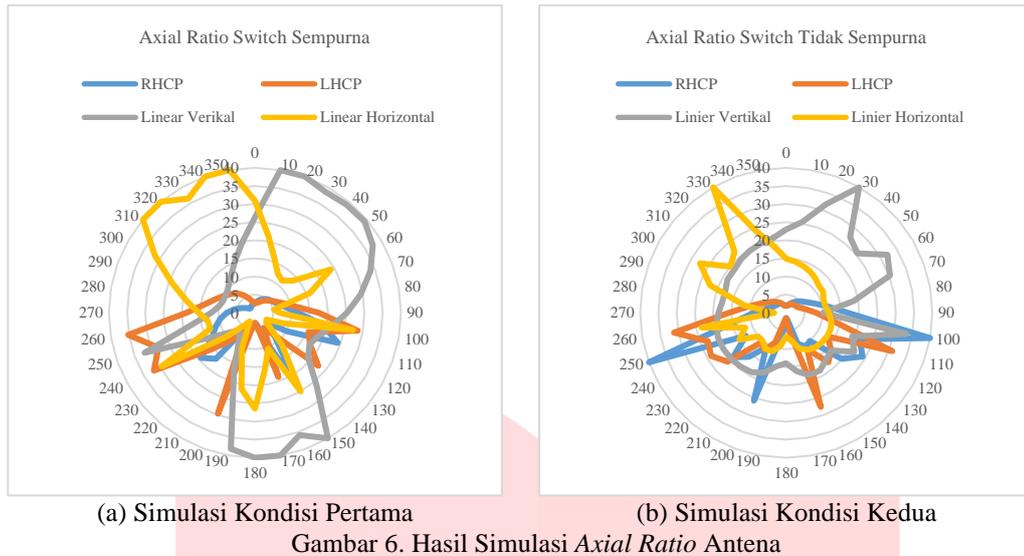
(b) Simulasi Kondisi Kedua

Gambar 5. Hasil Simulasi *Gain* Antena

Dari gambar 5 (a) untuk kondisi simulasi pertama menunjukkan nilai *gain* masing-masing konfigurasi polarisasi. Pada saat polarisasi RHCP memiliki *gain* = 1,504 dBi pada $\phi=31^\circ$ arah $\theta=350^\circ$. Pada saat polarisasi LHCP memiliki *gain* = 1,47 dBi pada $\phi=31^\circ$ arah $\theta=10^\circ$. Pada saat polarisasi linier vertikal memiliki *gain* = 1,02 dBi pada $\phi=0^\circ$ arah $\theta=10^\circ$. Dan pada saat polarisasi linier horizontal memiliki *gain* = 1 dBi pada $\phi=120^\circ$ arah $\theta=350^\circ$.

Sedangkan untuk kondisi simulasi kedua dapat dilihat dari gambar 5 (b) menunjukkan nilai *gain* masing-masing konfigurasi polarisasi. Pada saat polarisasi RHCP memiliki *gain* = 0,14 dBi pada $\phi=48^\circ$ arah $\theta=20^\circ$. Pada saat polarisasi LHCP memiliki *gain* = 0,142 dBi pada $\phi=43^\circ$ arah $\theta=340^\circ$. Pada saat polarisasi linier vertikal memiliki *gain* = 0,773 dBi pada $\phi=65^\circ$ arah $\theta=30^\circ$. Dan pada saat polarisasi linier horizontal memiliki *gain* = 0,85 dBi pada $\phi=25^\circ$ arah $\theta=330^\circ$.

Dari kedua kondisi simulasi dapat kita analisis bahwa saat *switch* diganti dengan kabel tembaga *gain* dari antenna mengalami penurunan yang cukup signifikan. Setelah mengetahui masing-masing arah *gain* maksimum dari setiap konfigurasi polarisasi maka dapat diketahui masing-masing *axial ratio* dari arah tersebut.

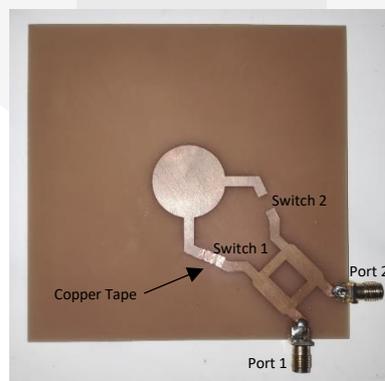


Untuk kondisi simulasi pertama dari gambar 6 (a) menunjukkan masing-masing *axial ratio* dari setiap konfigurasi. Untuk polarisasi RHCP 2,54 dB dan LHCP 2,73 dB. Dari kedua polarisasi sirkular terpenuhi *axial ratio* < 3 dB. Untuk polarisasi linier vertikal 40 dB dan polarisasi linier horizontal 40 dB. Dari kedua polarisasi linier terpenuhi *axial ratio* ≥ 40 dB. Dari hasil *return loss* dan *axial ratio* dapat disimpulkan bahwa desain dari antena yang telah dirancang telah memenuhi spesifikasi yang ada pada tabel 1.

Lalu pada kondisi simulasi kedua dari gambar 6 (b) menunjukkan masing-masing *axial ratio* dari antena untuk setiap konfigurasi. Untuk polarisasi RHCP 2,536 dB dan LHCP 2,46 dB. Dari kedua polarisasi sirkular terpenuhi *axial ratio* < 3 dB. Untuk polarisasi linier vertikal 40 dB dan polarisasi linier horizontal 40 dB. Dari kedua polarisasi linier terpenuhi *axial ratio* ≥ 40 dB. Dari hasil *return loss* dan *axial ratio* meskipun terdapat kondisi *switch* yang tidak sempurna dapat disimpulkan bahwa desain dari antena yang telah dirancang tetap memenuhi spesifikasi yang ada pada tabel 1.

3.3 Realisasi dan Pengukuran Antena

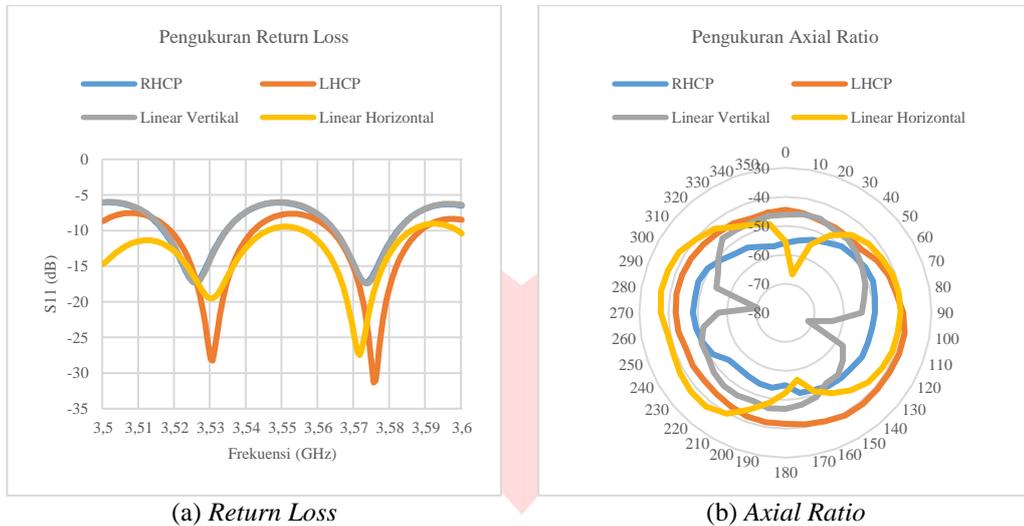
Setelah hasil simulasi telah memenuhi spesifikasi, selanjutnya desain dari antena tersebut perlu direalisasikan dengan mencetak antena tersebut. Jenis *substrate* yang digunakan saat mencetak antena perlu disesuaikan dengan simulasinya. *Substrate* yang digunakan ialah FR-4 dengan $\epsilon_r = 4,3$. Untuk realisasi *switch* yang digunakan ialah dengan menggunakan *copper tape*. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 7 saat *switch* dalam kondisi *close circuit* maka *copper tape* dipasang sedangkan saat *open circuit* maka *copper tape* tidak dipasang.



Gambar 7. Realisasi Antena

Setelah antena berhasil direalisasikan maka diperlukan pengukuran dari antena tersebut. Sama seperti saat simulasi antena, untuk pengukuran dari antena yang telah direalisasikan yaitu *return loss* dan *axial ratio* dari setiap konfigurasi polarisasi. Pengukuran dilakukan dengan

menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA). Untuk mengukur *return loss* cukup dengan menyambungkan antara antenna serta VNA. Sedangkan untuk mengetahui *axial ratio* diperlukan antenna referensi yang merupakan antenna *dipole* untuk mengukur *magnitude* dari antenna saat $0^\circ - 360^\circ$ untuk setiap 5° .



Gambar 8. Hasil Pengukuran Antena

Dari gambar 8 yang merupakan hasil dari *return loss* dapat kita lihat bahwa tidak semua frekuensi menghasilkan *return loss* ≤ -10 dB untuk setiap konfigurasi polarisasi. Begitu pula dengan *axial ratio* yang dihasilkan pada setiap konfigurasi polarisasi. Untuk polarisasi RHCP *return loss* ≤ -10 dB hanya pada rentang frekuensi 3,517 GHz – 3,534 GHz dan 3,565 GHz – 3,582 GHz serta *axial ratio* 3,64 dB. Untuk polarisasi LHCP *return loss* ≤ -10 dB hanya pada rentang frekuensi 3,519 GHz – 3,542 GHz dan 3,564 GHz – 3,589 GHz serta *axial ratio* 3,14 dB. Untuk polarisasi linier vertikal *return loss* ≤ -10 dB hanya pada rentang frekuensi 3,517 GHz – 3,534 GHz dan 3,565 GHz – 3,582 GHz serta *axial ratio* 26,24 dB. Dan untuk polarisasi linier horizontal *return loss* ≤ -10 dB hanya pada rentang frekuensi 3,5 GHz – 3,546 GHz dan 3,556 GHz – 3,6 GHz serta *axial ratio* 29,82 dB. Hasil pengukuran mengalami pergeseran diakibatkan berbagai hal seperti fabrikasi yang tidak sempurna, kondisi alat yang sudah tidak optimum, serta kondisi ruangan yang tidak direkomendasikan.

Tabel 4. Hasil Simulasi dan Pengukuran Antena

No	Polarisasi	Simulasi Kondisi Switch Sempurna		Simulasi Kondisi Switch Tidak Sempurna		Pengukuran Antena	
		Return Loss ≤ -10 dB	Axial Ratio	Return Loss ≤ -10 dB	Axial Ratio	Return Loss ≤ -10 dB	Axial Ratio
1	RHCP	3,19 GHz – 4,45 GHz	2,54 dB	3,07 GHz – 3,92 GHz	2,536 dB	3,517 GHz – 3,534 GHz & 3,565 GHz – 3,582 GHz	3,64 dB
2	LHCP	3,19 GHz – 4,45 GHz	2,73 dB	3,07 GHz – 3,92 GHz	2,46 dB	3,519 GHz – 3,542 GHz & 3,564 GHz – 3,589 GHz	3,14 dB
3	Linier Vertikal	3,48 GHz – 3,67 GHz	40 dB	3,1 GHz – 4,21 GHz	40 dB	3,517 GHz – 3,534 GHz & 3,565 GHz – 3,582 GHz	26,24 dB

4	Linier Horizontal	3,48 GHz – 3,67 GHz	40 dB	3,1 GHz – 4,21 GHz	40 dB	3,5 GHz – 3,546 GHz & 3,556 GHz – 3,6 GHz	29,82 dB
---	-------------------	---------------------	-------	--------------------	-------	---	----------

4. Kesimpulan

Dari penelitian kali ini yang berjudul "Antena *Polarization-Reconfigurable* dengan Rangkaian Pencatu *Hybrid Coupler*" telah dirancang antenna yang dapat menghasilkan empat polarisasi yaitu RHCP, LHCP, linier vertikal dan linier horizontal dengan frekuensi 3,5 GHz – 3,6 GHz. Antena tersebut merupakan antenna mikrostrip dengan *patch* sirkular serta menggunakan 90° *hybrid coupler* untuk mencapai polarisasi sirkular. Dalam konfigurasi perubahan polarisasi digunakan *switch* pada setiap ujung dari *output hybrid coupler* serta dengan mengganti *input* yang digunakan.

Untuk simulasi dilakukan dalam dua kondisi yaitu pertama *switch* dalam kondisi sempurna dan kondisi kedua *switch* dalam kondisi tidak sempurna yaitu dengan menggunakan kabel tembaga. Untuk hasil simulasi pada kedua kondisi setiap konfigurasi dari polarisasi mencapai spesifikasi yang diharapkan. Namun terjadi perubahan pada *gain* serta *bandwidth* dari antenna saat polarisasi diubah.

Sedangkan saat pengukuran spesifikasi dari antenna yang dipabrikasi belum sesuai dengan harapan. Untuk polarisasi RHCP saat simulasi *return loss* ≤ -10 dB terjadi pada seluruh rentang frekuensi dan *axial ratio* sebesar 2,54 dB sedangkan saat pengukuran *return loss* ≤ -10 dB hanya pada rentang frekuensi 3,517 GHz – 3,534 GHz dan 3,565 GHz – 3,582 GHz serta *axial ratio* 3,64 dB. Untuk polarisasi LHCP saat simulasi *return loss* ≤ -10 dB terjadi pada seluruh rentang frekuensi dan *axial ratio* sebesar 2,73 dB sedangkan saat pengukuran *return loss* ≤ -10 dB hanya pada rentang frekuensi 3,519 GHz – 3,542 GHz dan 3,564 GHz – 3,589 GHz serta *axial ratio* 3,14 dB. Untuk polarisasi linier vertikal saat simulasi *return loss* ≤ -10 dB terjadi pada seluruh rentang frekuensi dan *axial ratio* sebesar 40 dB sedangkan saat pengukuran *return loss* ≤ -10 dB hanya pada rentang frekuensi 3,517 GHz – 3,534 GHz dan 3,565 GHz – 3,582 GHz serta *axial ratio* 26,24 dB. Dan untuk polarisasi linier horizontal saat simulasi *return loss* ≤ -10 dB terjadi pada seluruh rentang frekuensi dan *axial ratio* sebesar 40 dB sedangkan saat pengukuran *return loss* ≤ -10 dB hanya pada rentang frekuensi 3,5 GHz – 3,546 GHz dan 3,556 GHz – 3,6 GHz serta *axial ratio* 29,82 dB. Dari hasil pengukuran memang belum menyentuh angka yang sesuai dengan spesifikasi antenna namun hasil tersebut dapat dioptimalkan dengan menyempurnakan pabrikan, menggunakan alat ukur yang masih optimal serta mengukur ditempat yang direkomendasikan yaitu *anechoic chamber*.

Referensi

- [1] Balanis, Constantine A, *Antenna theory: analysis and design*, John wiley & sons, 2016.
- [2] Voronovich, Alexander G, *Wave scattering from rough surfaces*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] Tajvidy, Ali, "Diffraction loss model at 0.3–6 GHz for 5G cellular system in microcell urban areas," *Electromagnetics*, vol. 39, No. 3, pp. 168-185, 2019.
- [4] Costantine, Joseph, et al, "Reconfigurable antennas: Design and applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, No. 3, pp. 424-437, March 2015.
- [5] Christodoulou, Christos G., et al, "Reconfigurable antennas for wireless and space applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, No. 7, pp. 2250-2261, July 2012.
- [6] Sathe, Shreyas J., and Jagadish C. Mudiganti, "A polarization reconfigurable antenna for satellite communication," 2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP), IEEE, 2017.
- [7] Pozar, David M, *Microwave engineering*, John wiley & sons, 2011.
- [8] Bancroft, Randy, *Microstrip and printed antenna design*, The Institution of Engineering and Technology, 2009.