

# PENGARUH PENYUSUNAN POLARISASI PADA SISTEM ANTENA MIMO TERHADAP KAPASITAS KANAL

Abdurrahman Rizki<sup>1</sup>, Aloysius Adya Pramudita<sup>2</sup>, Trasma Yunita<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Indonesia, 40257

<sup>1</sup>abdurahmanrizki@students.telkomuniversity.ac.id,

<sup>2</sup>pramuditaadya@telkomuniversity.ac.id, <sup>3</sup>trasmayunita@telkomuniversity.ac.id

## Abstrak

Sistem *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) merupakan teknologi yang berpotensi untuk dikembangkan dalam meningkatkan kapasitas kanal. Peningkatan kapasitas kanal pada sistem MIMO tidak hanya ditentukan oleh jumlah antena, namun ditentukan oleh karakteristik dan konsep penyusunan antena. Penelitian ini melakukan identifikasi pengaruh penyusunan polarisasi *circular* pada sistem antena MIMO terhadap kapasitas kanal. *Co-polarization* terdiri dari konfigurasi *Left Hand Circular Polarization* (LHCP) dan *Right Hand Circular Polarization* (RHCP), sedangkan *cross-polarization* terdiri dari konfigurasi RHCP-LHCP. Antena *co-polarization* dengan konfigurasi LHCP menghasilkan estimasi kapasitas kanal 11,578 bps/Hz ketika berada pada *Signal to Noise Ratio* (SNR) terendah adalah 5 dB.

**Kata Kunci:** Antena, kapasitas kanal, MIMO, mutual coupling, polarisasi.

## Abstract

*Multiple Input Multiple Output* (MIMO) system is a technology that has the potential to be developed to increase channel capacity. The increase in channel capacity in the MIMO system is not only determined by the number of antennas, but is determined by the characteristics and arrangement of the antenna concept. This study identifies the effect of circular polarization on the MIMO antenna system on channel capacity. *Co-polarization* consists of a *Left Hand Circular Polarization* (LHCP) and *Right Hand Circular Polarization* (RHCP) configuration, while *cross-polarization* consists of an RHCP-LHCP configuration. The *co-polarization* of the antenna with the LHCP configuration results in an estimated channel capacity of 11,578 bps / Hz when it is at the lowest *Signal to Noise Ratio* (SNR) is 5 dB.

**Key Words:** Antenna, channel capacity, MIMO, mutual coupling, polarization.

## 1. PENDAHULUAN

Sistem *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) merupakan teknologi yang berpotensi untuk dikembangkan dalam meningkatkan kapasitas kanal. Peningkatan kapasitas kanal pada sistem MIMO tidak hanya ditentukan oleh jumlah antena yang digunakan, namun ditentukan oleh karakteristik dan konsep penyusunan antena [1][2][3].

Perancangan antena MIMO mensyaratkan aspek *mutual coupling* yang rendah [4][5]. Merujuk bahwa *mutual coupling* antar elemen antena dipengaruhi oleh orientasi polarisasi antena, maka diperlukannya penyusunan polarisasi untuk mengurangi *level coupling* antar elemen pada antena MIMO [6] [7]. Penelitian awal [6] [7] menunjukkan bahwa penyusunan polarisasi akan memberikan dampak terhadap capaian kapasitas kanal dari sistem MIMO.

Masing-masing dari polarisasi tersebut mempunyai karakteristik yang berbeda salah satunya polarisasi *circular* memiliki *Left Hand Circular Polarization* (LHCP) dan *Right Hand Circular Polarization* (RHCP) [8].

Dalam hal ini penulis mengangkat topik mengenai Pengaruh Penyusunan Polarisasi pada Sistem Antena MIMO terhadap Kapasitas Kanal. Penyusunan polarisasi yang digunakan *co-polarization* konfigurasi LHCP dan RHCP. Sedangkan *cross-polarization* konfigurasi RHCP-LHCP. Spesifikasi antena menggunakan antena MIMO mikrostrip *patch rectangular* bekerja pada frekuensi 5,188 GHz dengan menggunakan teknik *corner truncated* yang didesain menjadi delapan elemen.

## 2. KONSEP DASAR

### 2.1 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Sistem *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) adalah sistem penyusun lebih dari satu antena pada sisi pemancar ataupun sisi penerima dan biasanya ditulis dengan MIMO *MN*. Sistem MIMO merupakan pengembangan dari *wireless 802.11ac* [9].

Penggunaan sistem MIMO membutuhkan jarak antar antena, adapun perumusan untuk mendapatkan nilai jarak antar antena [10]:

$$d = \frac{\lambda_{er}}{2} \quad (1)$$

$\lambda_{er}$  adalah panjang gelombang pada bahan substrat, nilai  $\lambda_{er}$  dinyatakan dalam:

$$\lambda_{er} = \frac{\lambda_0}{\epsilon_r} \quad (2)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (3)$$

$\lambda_0$  adalah panjang gelombang diudara,  $c$  adalah kecepatan cahaya diruang bebas dan  $f_0$  adalah frekuensi kerja antena.

### 2.2 Return loss

*Return loss* adalah parameter yang digunakan untuk mengetahui berapa banyak daya yang hilang pada beban. *Return loss* terjadi karena impedansi saluran transmisi dan antena *mismatched*, serta didefinisikan dalam [11]:

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (4)$$

$\Gamma$  adalah nilai koefisien pantul. Untuk *matching* antara *transmitter* dan antena, maka nilai  $\Gamma = 0$  yang berarti bahwa nilai *return loss* tidak ada daya yang dipantulkan. Apabila nilai  $\Gamma = 1$  maka semua daya dipantulkan [11].

### 2.3 Mutual Coupling

Perancangan antena MIMO mempertimbangkan *mutual coupling* rendah agar daya yang dipancarkan tidak diterima oleh antena sebelahnya dengan cara mengatur jarak antar antena, selain itu penyusunan polarisasi dapat mengurangi *level coupling* antar elemen pada sistem MIMO [7] dan *mutual coupling* diharapkan bernilai  $\leq -20$  dB [11]. *Mutual coupling* dapat dihitung dengan melihat besaran isolasi.

Isolasi merupakan perspektif sempit dari *mutual coupling* dan dapat dilihat dari masing-masing *parameter mutual coupling*. Sebagai contoh menghitung *coupling* dengan menggunakan  $S_{21}$  seperti persamaan berikut [12]:

$$MC = -10 \log_{10} |S_{21}|^2 \quad (5)$$

## 2.4 Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal adalah kecepatan pengiriman suatu data maksimum dengan probabilitas error kecil [13]. Kapasitas kanal ditinjau dari nilai efisiensi spektral. Efisiensi spektral adalah jumlah dari banyak efisiensi pengirim data pada sebuah sel dalam jaringan selular dan satuannya bps/Hz. Perhitungan kapasitas kanal menggunakan perhitungan dari penelitian sebelumnya [14] [15]. Tahapan perhitungan kapasitas kanal meliputi:

### 1. Menghitung Z-Parameter

Perhitungan kapasitas kanal dimulai dengan menghitung matriks *mutual impedance* untuk antena transmitting ( $Z_t$ ) dan receiving ( $Z_r$ ) yang ditulis seperti [6]:

$$Z_t = \begin{pmatrix} 1 & \frac{Z_{12}}{Z_{s2}+Z_{22}} & \dots & \frac{Z_{1M}}{Z_{sM}+Z_{MM}} \\ \frac{Z_{21}}{Z_{s1}+Z_{11}} & 1 & \dots & \frac{Z_{2M}}{Z_{sM}+Z_{MM}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Z_{M1}}{Z_{s1}+Z_{11}} & \frac{Z_{M2}}{Z_{s2}+Z_{22}} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$Z_{sm}$  dan  $Z_{mm}$  mewakili sumber impedansi dan *self-impedance* antena untuk elemen  $m - th$ , sementara  $Z_{tm}$  mewakili *mutual impedance* antara elemen  $t - th$  dan  $m - th$ , dengan  $m, t = 1, 2, \dots, M$ .  $M$  merupakan jumlah elemen dari *transmitting array*.

$$Z_r = \begin{pmatrix} 1 & \frac{-Z_{12}}{Z_T} & \dots & \frac{-Z_{1N}}{Z_T} \\ \frac{-Z_{21}}{Z_T} & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{-Z_{N1}}{Z_T} & \frac{-Z_{N2}}{Z_T} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$Z_T$  dan  $Z_{tn}$  mewakili *terminal impedance* dan *mutual coupling* antara elemen  $t - th$  dan  $n - th$ , dengan  $n, t = 1, 2, \dots, N$  dan  $N$  adalah jumlah elemen dari *receiving array*.

### 2. Menghitung Matriks Kanaldescription

Setelah mendapatkan nilai dari matriks *mutual impedance* untuk antena *transmitting* ( $Z_t$ ) dan *receiving* ( $Z_r$ ) didapatkan, perhitungan dilanjutkan dengan menghitung matriks kanal dengan menggunakan [6]:

$$H = Z_r^{-1} H_S Z_t^{-1} \quad (8)$$

$H$  adalah matriks kanal yang dihitung dari invers matriks *mutual impedance* antena *transmitting* ( $Z_t$ ) dan *receiving* ( $Z_r$ ), dan matriks korelasi spasial ( $H_S$ ). Pada sistem *multi-antenna* terdapat kanal yang antar-kanalnya saling berkorelasi, hal ini disebut korelasi spasial ( $H_S$ ) yang dibentuk

dalam persamaan:

$$\rho_{r,m,n}(d_{r-M,N}) = j_0(d_{r-M,N}) \quad (9)$$

$$\rho_t(d_{t-M,N}) = j_0(d_{t-M,N}) \quad (10)$$

$$\rho_h = \rho_{r,m,n} \otimes \rho_{t,m,n} \quad (11)$$

$\rho_t(m,n)$  adalah matriks korelasi spasial di antena transmitter, sedangkan  $\rho_r(m,n)$  adalah matriks korelasi spasial di antena receiver. Nilai eigen dan vektor eigen dari hasil operasi *kroncker*  $\rho_r \otimes \rho_t$  dapat dihitung dengan persamaan:

$$H_s = V\sqrt{D}r \quad (12)$$

$V$  adalah bentuk matriks kolom dari  $\rho_r \otimes \rho_t$ , sedangkan  $D$  adalah matriks diagonal dengan elemen diagonalnya adalah nilai eigen  $\rho_r \otimes \rho_t$ , dan  $r$  adalah vektor yang berisi nilai kompleks *random Gaussian* yang bersifat *Independent, and Identically Distributed* (IID) dengan nilai mean  $\mu = 0$ , dan mempertimbangkan unit variansi ( $\sigma^2$ ). Perhitungan kapasitas kanal pada dasarnya bersifat *random* karena sistem kanal dipengaruhi *noise* yang berbeda-beda disekitar lingkungannya. Model kanal *random* yang digunakan dalam pembentukan model kanal  $r$  dengan persamaan [14]:

$$r = \sqrt{0.5}(\text{randn}(N,M) + j \cdot \text{randn}(N,M)) \quad (13)$$

$n$  adalah banyaknya sampel percobaan,  $N$  adalah jumlah elemen dari *receiving array* dan  $M$  adalah jumlah elemen dari *transmitting array*.

### 3. Menghitung Kapasitas Kanaldescription

Setelah mendapatkan nilai dari matriks kanal ( $H$ ) didapatkan, perhitungan dilanjutkan dengan menghitung kanal menggunakan [6]:

$$C = E \left\{ \log_2 \det \left( 1_{N_r} + \frac{SNR}{M} HH' \right) \right\} \quad (14)$$

$C$  adalah kapasitas kanal MIMO dengan satuan bps/Hetz,  $E$  adalah ekspektasi operasi,  $1_{N_r}$  adalah matriks identitas dari  $N_r N_r$  dengan  $N_r = \max(M,N)$ , dan  $S/N$  adalah *signal to noise power ratio*. Nilai efisiensi spektral yang terjadi bersifat *ergodic*. Hal ini dikarenakan nilainya berubah-ubah secara statistik.

### 2.5 Polarisasi Circular

Polarisasi *circular* dapat dicapai apabila *magnitude* sama namun waktu fasa berbeda. *Axial ratio* polarisasi *circular* dari  $0 < AR < 3$  dB. Polarisasi *circular* saat  $E_{x0} = E_{y0}$  maka [8]:

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{\pi}{2} \text{ (CW)} \quad (15)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\frac{\pi}{2} \text{ (CCW)} \quad (16)$$

Apabila rotasi polarisasi bergerak *clockwise* (CW) maka polarisasinya *Left Hand Circular Polarization* (LHCP) [12], sedangkan rotasi polarisasi bergerak *counter clockwise* (CCW) maka polarisasinya *Right Hand Circular Polarization* (RHCP) [12].

### 2.6 Metode Truncated

Bentuk *patch* yang sederhana salah satunya *patch rectangular*, namun radiasi gelombangnya berpolarisasi linier apabila menggunakan *feed* tanpa modifikasi [8]. Untuk mendapatkan polarisasi *circular* dilakukan dengan memodifikasi bentuk dan dimensi *patch*, yang membutuhkan pertubasi atau elemen pengganggu. Pertubasi yang digunakan yaitu *corner truncated* pada *patch*, dengan cara memotong kedua ujung pada *patch* [16].

Perpotongan sudut *patch rectangular* membentuk segitiga siku-siku dan perhitungannya menggunakan persamaan [17]:

$$s = \sqrt{\Delta S} \quad (17)$$

$\Delta S$  adalah luas dari perpotongan sudut antena.  $\Delta S$  didapatkan dari [17]:

$$\frac{\Delta s}{W} = \frac{1}{2Q} \quad (18)$$

$W$  adalah luas dari *patch* antena, sedangkan  $Q$  adalah faktor kualitas *patch* antena. Untuk mencari faktor kualitas antena, didapatkan dengan persamaan berikut [17]:

$$Q = \frac{f_0}{BW_n} \quad (19)$$

$f_0$  merepresentasikan frekuensi tengah dari antena tanpa antena tanpa *truncation* dan  $BW_n$  adalah *bandwidth* dari antena.

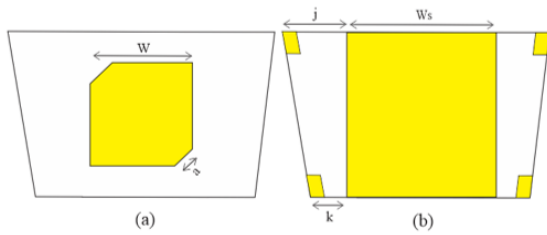
### 2.7 802.11ac

802.11ac merupakan standarisasi jaringan Wi-Fi generasi kelima yang dikeluarkan oleh *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [9] dan mendukung transmisi data diatas 1 Gbps. Secara umum, sinyal dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang direkomendasikan untuk *data network* yaitu 20 dB atau lebih. Spesifikasi dari jaringan 802.11ac beroperasi sub 5 GHz yang mengakibatkan lebih sedikit *interference* dari Wi-Fi sekitar, selain itu berkemampuan *Multi User-Multiple Input Multiple Output* (MU-MIMO) [9].

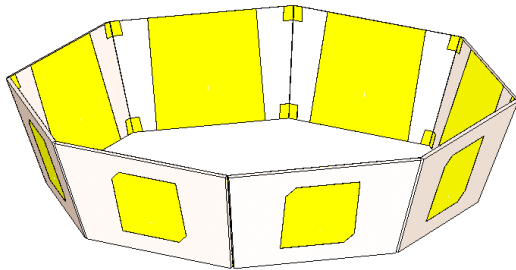
## 3. PERANCANGAN

### 3.1 Skenario Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada identifikasi pengaruh penyusunan polarisasi *circular* dengan mempertimbangan *mutual coupling* antar elemen antena untuk melihat pengaruhnya terhadap kapasitas



Gambar 1. Desain antenna tampak depan dan tampak belakang



Gambar 2. Desain antenna delapan elemen

kanal. Pemilihan polarisasi *circular* karena posisi *Left Hand Circular Polarization* (LHCP) dan *Right Hand Circular Polarization* (RHCP) yang *orthogonal* dapat dimanfaatkan untuk mengganggukan kapasitas kanal *link*, selain itu penyusunan polarisasi dapat mengurangi *coupling* antar elemen antenna *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Dalam perancangan antenna, spesifikasi bahan yang digunakan *patch* dan *groundplane* adalah *copper* dengan ketebalan 0,035 mm, substrat menggunakan Roger Duroid RO4003C dengan ketebalan 0,813 mm,  $\epsilon_r = 3,38$ .

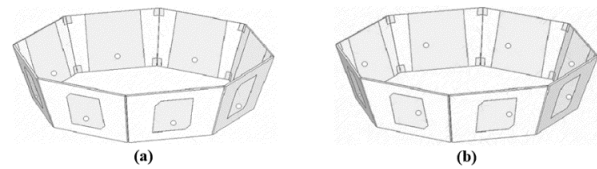
Tabel 1. Spesifikasi antenna

Spesifikasi	Deskripsi
Jenis antenna	Antena MIMO
Bentuk antenna	<i>Rectangular (corner truncated)</i>
Frekuensi kerja	5,150 s.d 5,825 GHz
<i>Mutual Coupling</i>	$\leq -20$ dB
Polarisasi	LHCP/RHCP ( $AR \leq 3$ dB)
<i>Return loss</i>	$\leq -10$ dB

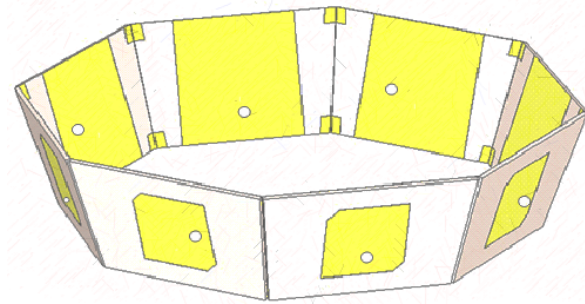
### 3.2 Desain Antena

Desain antenna yang dirancang menggunakan antenna delapan elemen, hal ini dikarenakan untuk membuat antenna memiliki pola radiasi ke segala arah (*omnidirectional*) seperti Gambar 2. Gambar 1 merupakan desain antenna tampak depan dan tampak belakang.

Antena yang dirancang memiliki *co-polarization* konfigurasi LHCP dan RHCP seperti Gambar 3.



Gambar 3. *Co-polarization* konfigurasi (a) LHCP, (b) RHCP



Gambar 4. *Cross-polarization* konfigurasi RHCP-LHCP

Sedangkan *cross-polarization* seperti Gambar 4. Orientasi polarisasi tersebut didapatkan dari peletakkan *port* diletakkan berdasarkan sumbu X dan sumbu Y. Konfigurasi LHCP diletakkan pada sumbu Y negatif, sedangkan konfigurasi RHCP diletakkan pada sumbu X positif.

### 3.3 Hasil Simulasi Ketiga Konfigurasi

Perbandingan dari ketiga konfigurasi diambil dari *return loss* dan sampel *mutual coupling*. Perbandingan ini digunakan sebagai acuan dalam memilih salah satu konfigurasi polarisasi terbaik berdasarkan *mutual coupling* yang terendah. Tabel 2 adalah nilai *return loss* dari konfigurasi LHCP, RHCP, dan RHCP-LHCP. Berdasarkan nilai dari tabel ditunjukkan bahwa hasil dari *cross-polarization* lebih rendah dibandingkan *co-polarization*, akan tetapi nilai dari *return loss* ketiga konfigurasi tersebut memenuhi spesifikasi batas dari *return loss* yaitu  $\leq -10$  dB.

Tabel 3 adalah sampel  $MC_{21}$  dari konfigurasi LHCP, RHCP dan RHCP-LHCP. Berdasarkan dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa *cross-polarization* mempunyai nilai *mutual coupling* lebih rendah dibanding *co-polarization*.

Hasil dari konfigurasi tersebut sesuai dengan teori dan penelitian [6] [7] yang menyatakan bahwa penyusunan polarisasi mengarah pada *coupling* yang rendah dengan menunjukkan bahwa *mutual coupling cross-polarization* lebih rendah daripada *co-polarization* karena pada antenna MIMO *cross-polarization* polarisasi yang dihasilkan saling *orthogonal*, maka *Polarization Loss Factor* (PLF)

**Tabel 2. Perbandingan return loss LHCP, RHCP dan RHCP-LHCP.**

Return loss	Co-polarization		Cross-polarization
	LHCP (dB)	RHCP (dB)	RHCP-LHCP (dB)
RL <sub>11</sub>	-10.412	-18.720	-19.343
RL <sub>22</sub>	-17.672	-14.943	-16.872
RL <sub>33</sub>	-10.430	-18.720	-18.150
RL <sub>44</sub>	-17.760	-14.904	-18.075
RL <sub>55</sub>	-10.661	-18.790	-18.225
RL <sub>66</sub>	-19.282	-14.856	-20.237
RL <sub>77</sub>	-10.714	-18.797	-19.254
RL <sub>88</sub>	-19.204	-14.909	-15.176

**Tabel 3. Perbandingan sampel mutual coupling S<sub>21</sub> LHCP, RHCP dan RHCP-LHCP.**

Mutual Coupling (MC)	Co-polarization		Cross-polarization
	LHCP (dB)	RHCP (dB)	RHCP-LHCP (dB)
MC <sub>21</sub>	-35.647	-29.203	-35.194
MC <sub>31</sub>	-43.777	-44.736	-45.576
MC <sub>41</sub>	-43.693	-45.701	-46.583
MC <sub>51</sub>	-42.169	-39.494	-38.706
MC <sub>61</sub>	-43.448	-44.682	-47.059
MC <sub>71</sub>	-43.870	-4.729	-45.338
MC <sub>81</sub>	-34.385	-28.893	-32.779

sama dengan nol dan tidak ada daya yang diterima antar elemen. Maka dipilih antenna MIMO *cross-polarization* konfigurasi RHCP-LHCP sebagai antenna yang difabrikasi.

#### 4. ANALISIS

##### 4.1 Analisis Kapasitas Kanal

Penelitian ini menggunakan *software* untuk mendapatkan data dari antenna yang dirancang dan perhitungan kapasitas kanal. Konfigurasi yang digunakan yaitu *co-polarization* (LHCP, RHCP), *cross-polarization* (RHCP-LHCP) yang didapat dari hasil simulasi dan *without polarization setting*. Maksud dari *without polarization setting* adalah kondisi ideal yang hanya menggunakan perhitungan jarak dari masing-masing elemen antenna tanpa memperhitungkan S-Parameter. Identifikasi kapasitas kanal yang dilakukan dengan membandingkan konfigurasi LHCP, RHCP (*co-polarization*) dan RHCP-LHCP (*cross-polarization*). Tabel 4 adalah

perbandingan efisiensi spektral *co-polarization*, *cross-polarization* dan *without polarization setting*. Ketika kondisi *without polarization setting* menghasilkan nilai rata-rata sebesar 24,240 bps/Hz dengan SNR terendah 5 dB yaitu 11,576 bps/Hz dan tertinggi 20 dB yaitu 39,069 bps/Hz, kondisi ini adalah kondisi ideal yang hanya menggunakan perhitungan jarak antar elemen antenna.

**Tabel 4. Perbandingan efisiensi spektral co-polarization, cross-polarization dan without polarization setting.**

SNR (dB)	Co-polarization		Cross-polarization	Without Polarization Setting
	LHCP (dB)	RHCP (dB)	RHCP-LHCP (dB)	
5	11.578	11.504	11.565	11.576
6	12.920	12.856	12.916	12.926
7	14.356	14.291	14.338	14.371
8	15.874	15.804	15.859	15.882
9	17.461	17.387	17.442	17.458
10	19.117	19.051	19.118	19.123
11	20.836	20.776	20.943	20.854
12	22.649	22.580	22.638	22.649
13	24.498	24.439	24.499	24.572
14	26.427	26.361	26.432	26.443
15	28.400	28.337	28.401	28.415
16	30.443	30.379	30.434	30.465
17	32.539	32.474	32.525	32.536
18	34.673	34.620	34.657	34.674
19	36.840	36.786	36.845	36.852
20	39.072	39.026	39.056	39.069
Average	24.230	24.167	24.223	24.240

Dari Tabel 4, diketahui bahwa efisiensi spektral yang dihasilkan antenna *co-polarization* konfigurasi LHCP memiliki hasil efisiensi spektral lebih baik daripada *co-polarization* konfigurasi RHCP dan *cross-polarization* walaupun perbedaan antara ketiga konfigurasi tersebut tidak signifikan. Hal ini disebabkan oleh pengaruh dari nilai S-Parameter (*return loss* dan *mutual coupling*). Kapasitas kanal akan meningkat apabila nilai *return loss* dan *mutual coupling* diperhatikan, apabila salah satu parameter nilainya tidak maksimal maka kapasitas kanal tidak maksimal. Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa pengaturan polarisasi berdampak pada kapasitas kanal.

## 5. KESIMPULAN

Terkait dengan penelitian ini disimpulkan bahwa penyusunan polarisasi perlu dilakukan dengan mempertimbangkan nilai *return loss* dan *mutual coupling* serendah mungkin karena akan memberikan dampak pada estimasi kapasitas kanal. *Mutual coupling* terendah yaitu *cross-polarization*, hal ini karena polarisasi yang dihasilkan saling *orthogonal*, maka *Polarization Loss Factor* (PLF) sama dengan nol dan tidak ada daya yang diterima antar elemen. Hasil efisiensi spektral *co-polarization* konfigurasi LHCP menghasilkan nilai rata-rata sebesar 24,230 bps/Hz dengan SNR terendah 5 dB yaitu 11,578 bps/Hz dan tertinggi 20 dB yaitu 39,073 bps/Hz.

### Daftar Pustaka

- [1] D. W. Bliss, K. W. Forsythe, and A. M. Chan, "Mimo wireless communication," *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 97–126, 2005.
- [2] T. L. Marzetta, "Massive mimo: an introduction," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 11–22, 2015.
- [3] F. De Flaviis, L. Jofre, J. Romeu, and A. Grau, "Multiantenna systems for mimo communications," *Synthesis Lectures on Antennas*, vol. 3, no. 1, pp. 1–250, 2008.
- [4] X. Liu, M. Bialkowski, and F. Wang, "Investigation into the effects of spatial correlation on mimo channel estimation and capacity," in *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. IEEE, 2008, pp. 1–4.
- [5] J. W. Wallace and M. A. Jensen, "Mutual coupling in mimo wireless systems: A rigorous network theory analysis," *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 3, no. 4, pp. 1317–1325, 2004.
- [6] E. Susanti, A. Pramudita, M. M. Rose *et al.*, "Mimo antenna with cross polarisation printed yagi elements for mimo router," in *2017 3rd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*. IEEE, 2017, pp. 65–69.
- [7] A. Pramudita, D. D. Ariananda *et al.*, "Array of eight circularly polarized microstrip antennas for ieee 802.11 ac mimo wlan," in *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [9] Cisco. Cisco System Inc, 2018, p. 1.
- [10] A. Sibille, C. Oestges, and A. Zanella, *MIMO: from theory to implementation*. Academic Press, 2010.
- [11] A. D. Purnamasari, R. P. Astuti, and B. S. Nugroho, "Perancangan dan analisis antena massive mimo mikrostrip patch persegi panjang dengan polarisasi linier untuk komunikasi 5g (28 ghz)," *eProceedings of Engineering*, vol. 4, no. 3, 2017.
- [12] D. M. Pozar, "Microwave engineering," *Fourth Editions, University of Massachusetts at Amherst, John Wiley & Sons, Inc*, pp. 26–30, 2012.
- [13] W. Middleton and M. E. Van Valkenburg, "Reference data for engineers: Radio, electronics," *Computer, and Communications. Number ISBN-10*, vol. 750672919, 2002.
- [14] X. Li and Z.-P. Nie, "Mutual coupling effects on the performance of mimo wireless channels," *IEEE antennas and wireless propagation letters*, vol. 3, pp. 344–347, 2004.
- [15] X. Liu and M. E. Bialkowski, "Effect of antenna mutual coupling on mimo channel estimation and capacity," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2010, 2010.
- [16] M. Shakeeb, H. Hammad, and A. Sebak, "Comprehensive study of single feeding techniques on circularly polarized microstrip antenna radiation pattern," in *IEEE Middle East Conference on Antennas and Propagation (MECAP 2010)*. IEEE, 2010, pp. 1–5.
- [17] R. A. Sainati, *CAD of microstrip antennas for wireless applications*. Artech House, Inc., 1996.