

## PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIMO 4X4 MIKROSTRIP PATCH PERSEGI PANJANG 5,2 GHZ UNTUK WIFI 802.11N

### DESIGN AND REALIZATION OF MIMO 4X4 RECTANGULAR PATCH MICROSTRIP ANTENNA 5,2 GHZ FOR WIFI 802.11N

Angga Budiawan Adipurnama<sup>1</sup>, Heroe Wijanto<sup>2</sup>, Yuyu Wahyu<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung

<sup>3</sup>Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi LIPI, Bandung

<sup>1</sup>adipurnama.angga@gmail.com, <sup>2</sup>heroe@telkomuniversity.ac.id, <sup>3</sup>yuyu@ppet.lipi.go.id

#### Abstrak

Meningkatnya kebutuhan transfer data cepat dan dalam jumlah yang banyak pada pengguna Wifi mendorong munculnya teknologi dan standar baru. IEEE telah merilis standar 802.11n, dengan perubahan dari standar sebelumnya adalah *datarate* lebih tinggi, *bandwidth* lebih lebar dan mendukung teknologi MIMO. Tantangan dari penggunaan teknik MIMO ini pada terminal pengguna adalah bagaimana mendesain *multiple* antena yang antarantenanya memiliki nilai *mutual coupling* kecil namun tidak membuat dimensi antena keseluruhan menjadi terlalu besar.

Jurnal ini membahas perancangan antena mikrostrip 4x4 MIMO untuk Wifi yang bekerja di frekuensi 5,180-5,220 GHz. Desain dan simulasi dilakukan pada software CST Studio Suite 2014. Setelah hasil simulasi sesuai spesifikasi, kemudian dibuat prototypenya dan dilakukan pengukuran secara langsung.

Antena yang direalisasikan memiliki dimensi 49,475 mm x 49,475 mm, dapat bekerja pada frekuensi 5,180-5,220 GHz. Keempat antena memiliki  $VSWR \leq 1,5$  dan  $mutual\ coupling \leq -20$  dB. *Bandwidth* antena 1 hingga 4 berturut-turut 92 MHz, 96 MHz, 68 MHz, dan 83 MHz. *Gain* yang dihasilkan antena 1 hingga 4 berturut-turut 3,306 dBi, 3,428 dBi, 3,38 dBi, dan 3,315 dBi. Pola radiasi yang dihasilkan *unidirectional* dengan polarisasi elips.

**Kata kunci :** antena MIMO, Wifi, *rectangular patch*

#### Abstract

The increasing need for faster and larger data transfer in Wifi users encourage the emergence of new technologies and standards. IEEE 802.11n standard has been released, offers higher *datarate*, wider *bandwidth* and supports MIMO technology than previous standard. Challenge of using MIMO techniques in user's device is how to design an antenna that has small *mutual coupling* but do not make the overall antenna dimensions become too large.

This journal discuss about making 4x4 MIMO microstrip antenna for Wifi that works in 5.180 to 5.220 GHz frequency. Design and simulation are done in CST 2014 Studio Suite. After simulation result meets specification, antenna prototype will be built and measured.

Dimension of realized antenna is 49,475 mm x 49,475 mm, can work at 5,180 to 5,220 GHz frequency. All antenna has  $VSWR \leq 1.5$  and  $mutual\ coupling \leq -20$  dB. *Bandwidth* of the antenna 1 to 4 consecutively are 92 MHz, 96 MHz, 68 MHz, and 83 MHz. *Gain* antenna 1 to 4 consecutively are 3.306 dBi, 3.428 dBi, 3.38 dBi, and 3.315 dBi. The antenna has *unidirectional* radiation pattern with elliptical polarization.

**Keywords:** MIMO antenna, WiFi, *rectangular patch*

#### 1. Pendahuluan

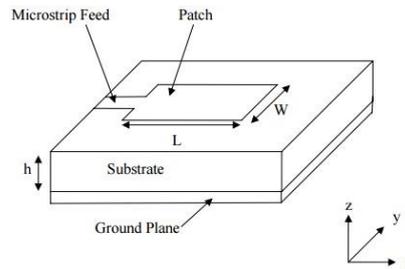
Meningkatnya kebutuhan transfer data cepat dan dalam jumlah yang banyak pada pengguna Wifi mendorong munculnya teknologi dan standar baru. Salahsatu cara untuk menghadapi tuntutan tersebut adalah menerapkan teknik MIMO. Teknik MIMO adalah penggunaan lebih dari satu antena pada pengirim maupun penerima. Teknik ini menjadi salahsatu solusi kebutuhan transfer data yang lebih cepat dan lebih besar, serta mengatasi *multipath fading*. Agar antarantena tidak saling mempengaruhi, setiap antena harus diberi jarak agar nilai *mutual coupling* kecil. Semakin jauh jarak antena, *mutual coupling* semakin kecil, namun dimensi antena keseluruhan akan menjadi besar dan sulit diterapkan pada perangkat pengguna.

Sebelumnya, Galih Yogi Fanani sudah membuat antena mikrostrip MIMO 4x4 *patch rectangular* pada frekuensi 2,3-2,39 GHz untuk LTE[3]. Antena yang dirancang mengambil bentuk yang sama dengan penelitian yang dilakukan Galih Yogi Fanani, namun kali ini antena disesuaikan agar dapat bekerja pada frekuensi 5 GHz untuk Wifi 802.11n. Frekuensi 5 GHz dipilih untuk mendapatkan potensi performa sepenuhnya dari 802.11n[5]. *Patch rectangular* dimodifikasi dengan pemberian *inset feed* dengan harapan *return loss* lebih kecil dan *bandwidth* lebih lebar. Selain itu, posisi *port* antena akan diubah menjadi bersudut 90°. Hal ini mengacu pada penelitian yang

dilakukan oleh Robby Gilang Tobing pada dua antena mikrostrip, di mana antena yang disusun dengan konfigurasi sudut 90° memiliki nilai *mutual coupling* yang lebih baik dari konfigurasi sudut lainnya[9]. Perubahan yang dilakukan diharapkan akan menghasilkan antena mikrostrip MIMO 4x4 dengan nilai *mutual coupling* kecil dan dimensi antena keseluruhan tidak terlalu besar untuk diterapkan di terminal pengguna.

**2. Antena mikrostrip patch rectangular**

Antena merupakan struktur transisi antara gelombang terbimbing (saluran transmisi) dengan gelombang ruang bebas atau sebaliknya[1]. Bentuk dan jenis antena bermacam-macam, salahsatunya mikrostrip. Antena mikrostrip terdiri dari tiga bagian, yaitu elemen peradiasi (*patch*), substrat, dan elemen pentanahan (*groundplane*). Bentuk *patch* bisa bermacam-macam disesuaikan dengan kebutuhan perancangan dan spesifikasi yang dituju. Bentuk *rectangular patch* biasanya akan menghasilkan polarisasi linier[1][2]. Struktur antena mikrostrip diperlihatkan pada gambar 1 :



Gambar 1. Struktur antena mikrostrip

Menghitung lebar *patch* :

$$W_p = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{re} + 1}} \tag{1}$$

Menghitung panjang *patch* :

$$L = \lambda_0 / 2 - 2\Delta L \tag{2}$$

$\Delta L$  adalah pertambahan panjang akibat *fringing effect* yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta L = 0,412 \times h \frac{(\epsilon_r + 0,3) (\frac{W}{h} + 0,264)}{(\epsilon_r - 0,258) (\frac{W}{h} + 0,8)} \tag{3}$$

$\epsilon_{re}$  adalah konstanta dielektrik efektif *patch* yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{1 + 12 \frac{W_p}{h}} \right) \tag{4}$$

**3. Teknik Pencatuan Antena *Microstrip Line* dengan *inset feed***

Ada 3 teknik pencatuan dalam antena mikrostrip, yaitu *microstrip line*, *coaxial probe*, dan *proximity coupled*. Karena kemudahan dalam desain dan fabrikasi, maka teknik *microstrip line* dipilih untuk pengerjaan antena ini. Teknik pencatuan *Microstrip Line* adalah pencatuan dilakukan dengan cara menghubungkan saluran pencatu dengan *patch*, dimana *keduanya* menggunakan bahan yang sama yang difabrikasi dengan cara *di-etching*-kan.

Resistansi masukan pada *microstrip line* dapat diubah dengan menambahkan *inset feed*, sebuah celah menjorok dari *microstrip line* ke dalam *patch*[1]. Teknik ini dapat digunakan secara efektif untuk menyepadan *patch* antena menggunakan *microstrip line*.



Gambar 2 *Inset feed*

Lebar *microstrip line* dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$W_m = \frac{2h}{\pi} (\beta - 1 - \ln(2\beta - 1)) + \frac{\epsilon_r^{-1}}{2\epsilon_r} [\ln(\beta - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r}] \tag{5}$$

$$\beta = \frac{60 \pi^2}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_r}} \tag{6}$$

Untuk  $W_m/h > 1$ , menggunakan persamaan

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W_m}}}$$

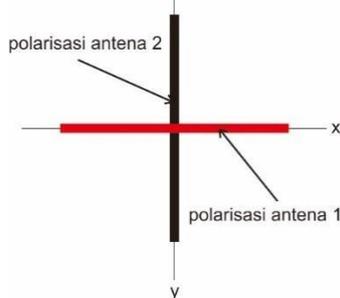
Panjang *microstrip line* dihitung menggunakan transformator  $\epsilon_r/4$  :

$$L_m = \frac{\frac{l_0}{\sqrt{\epsilon_r}}}{4} \tag{7}$$

**4. MIMO**

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) merupakan sistem yang terdiri dari sejumlah terminal (antena) pengirim dan penerima. MIMO digunakan dalam teknologi wireless karena dapat meningkatkan *throughput* tanpa adanya tambahan *bandwidth* maupun *transmit power*. Karena itulah, MIMO menjadi salahsatu elemen penting dalam berbagai standar komunikasi nirkabel, misalnya IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac, HSPA+, WiMAX, dan LTE

Tatangan dalam pembuatan antenna MIMO adalah bagaimana mendesain antenna yang memiliki *mutual coupling* kecil namun dimensi keseluruhan antenna tidak terlalu besar. Cara termudah untuk meminimalisir *mutual coupling* adalah mengatur jarak antarantena dan peletakkan antenna. Semakin jauh jarak antarantena, maka pengaruh radiasi antenna satu terhadap lainnya semakin kecil. Selain itu, antenna dapat diletakkan sedemikian rupa hingga polarisasi antara antenna satu dengan lainnya saling ortogonal. Antenna yang berpolarisasi saling ortogonal menyebabkan korelasi diantara antenna semakin rendah[8]



Gambar 3. Dua antenna yang berpolarisasi saling tegak lurus

**5. Spesifikasi Antena**

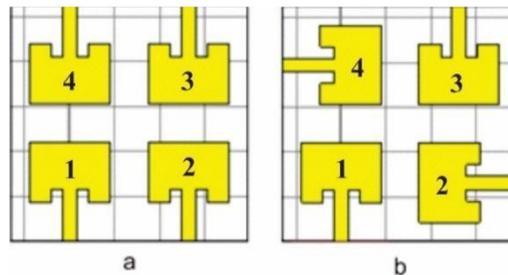
- a. Frekuensi kerja : 5,180-5,220 GHz
- b. Impedansi : 50 Ω
- c. Bandwidth : 40 MHz
- d. Gain : ≥ 2.5 dBi
- e. VSWR : ≤ 1,5
- f. *Return Loss* : ≤ -10 dB
- g. Polarisasi : linier
- h. Pola radiasi : Unidireksional
- i. Mutual coupling : ≤ -20dB

**6. Perancangan antenna**

**6.1 Pengaruh peletakkan port antenna dan jarak antarantena**

Perancangan dan simulasi dilakukan pada CST Studio Suite 2014. Terdapat dua skenario dalam peletakkan masing-masing antenna, di mana akan dicari peletakkan seperti apa yang memberikan nilai *mutual*

*coupling* paling kecil. Kedua konfigurasi port tersebut diperlihatkan pada gambar 4.



Gambar 4 (a) Konfigurasi port skenario satu, dan (b) konfigurasi port skenario dua

Hasil pengukuran *mutual coupling* pada masing-masing skenario diperlihatkan dalam tabel 1 :

Tabel 1. Pengaruh peletakkan antenna terhadap *mutual coupling*

S parameter	Skenario satu	Skenario dua (dB)
S <sub>11</sub>	-21,5564	-20,7105
S <sub>21</sub>	-19,3219	-37,6486
S <sub>31</sub>	-38,9178	-37,1564
S <sub>41</sub>	-31,0764	-34,6668

Peletakkan port antenna saling bersudut 90° memberikan nilai *mutual coupling* yang lebih kecil dibanding dengan lainnya, karena polarisasi antarantena menjadi saling tegak lurus sehingga interferensi antarantena kecil. Untuk mereduksi dimensi antenna keseluruhan, jarak antarantena akan diubah-ubah hingga didapat jarak terpendek yang memberikan performansi sesuai spesifikasi yang diinginkan. Pengaruh jarak antarantena terhadap *mutual coupling* dan *gain*.

Tabel 2. Pengaruh jarak antarantena terhadap *mutual coupling*

S Parameter	Nilai S Parameter				
	λ/4	λ/6	λ/8	λ/16	λ/32
S <sub>11</sub>	-20,71	-20,54	-21,64	-24,23	-23,12
S <sub>21</sub>	-37,65	-37,65	-36,07	-26,26	-18,52
S <sub>31</sub>	-37,16	-32,563	-28,51	-26,26	-31,35
S <sub>41</sub>	-34,67	-34,79	-34,45	-26,50	-18,75

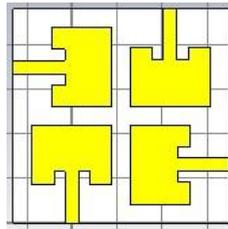
Tabel 3. Pengaruh jarak antarantena terhadap *gain*

Antena	Gain (dB)				
	λ/4	λ/6	λ/8	λ/16	λ/32
1	3,68	3,53	3,34	3,03	2,43

Semakin dekat jarak antarantena, *mutual coupling* semakin besar dan *gain* semakin kecil. Hal ini dikarenakan pengaruh radiasi dari antenna yang bersebelahan semakin besar. Berdasarkan data dari tabel 1,2, dan 3, maka pada perancangan ini dipilih posisi peletakkan *port* antenna saling bersudut 90° dengan jarak antarantena λ/8. Berikut dimensi desain antenna setelah optimasi menggunakan CST Studio Suite 2014 :

Tabel 4. Dimensi antenna

Parameter	Nilai (mm)	Keterangan
Lp	13,4730	Panjang <i>patch</i>
Lm	8,4975	Panjang <i>line</i> pencatu
Ls	3	Panjang <i>insertion feed</i>
Wp	17,6600	Lebar <i>patch</i>
Wm	3,0842	Lebar <i>line</i> pencatu
Ws	2,5	Lebar <i>insertion feed</i>
s	4,2375	Jarak antarantena
Wg	47,9748	Lebar <i>groundplane</i>
Lg	47,9748	Panjang <i>groundplane</i>



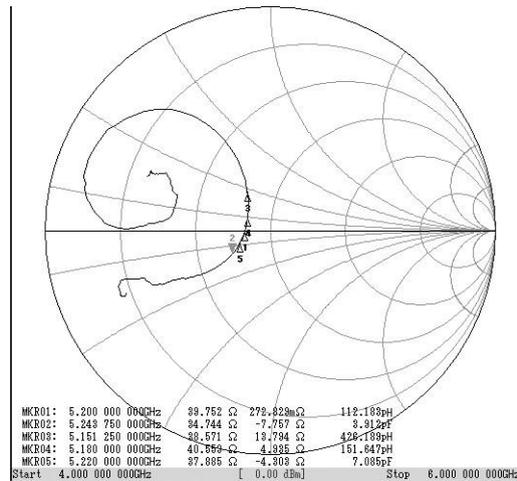
Gambar 5. Desain antenna MIMO 4x4

**7. Hasil Simulasi dan Pengukuran**

**7.1 Pengukuran Impedansi, VSWR, bandwidth, dan Parameter S**

Pengukuran dilakukan dengan menghubungkan *probe* pada *Network Analyzer* ke masing-masing *port* antenna secara bergantian. Ketika sedang mengukur antenna 1, maka *port* antenna lainnya yang tidak terhubung dengan *network analyzer* ditutup dengan terminasi 50 Ω.

**a. Impedansi**

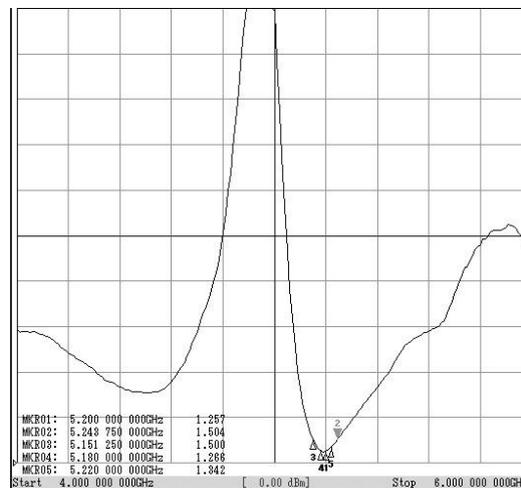


Gambar 6. Impedansi antenna 1

Tabel 5. Perbandingan impedansi anten hasil simulasi dan pengukuran

Antena	Impedansi	
	Simulasi	Pengukuran
Antena 1	53,817 + j7,722	39,753 + j0,272
Antena 2	53,817 + j7,722	40,853 + j1,609
Antena 3	53,817 + j7,722	39,356 + j2,264
Antena 4	53,817 + j7,722	40,088 + j1,607

**b. VSWR dan bandwidth**



Gambar 7. Grafik VSWR anatena 1

Tabel 6. Perbandingan VSWR dan *bandwidth* antena antara simulasi dengan pengukuran

Antena	VSWR		<i>Bandwidth</i>	
	Simulasi	Pengukuran	Simulasi	Pengukuran
Antena 1	1,18	1,257	143 MHz	92 MHz
Antena 2	1,18	1,227	143 MHz	96 MHz
Antena 3	1,18	1,277	143 MHz	68 MHz
Antena 4	1,18	1,250	143 MHz	83 MHz

Keempat antena rata-rata memiliki VSWR 1,25. Hal ini sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan yaitu VSWR  $\leq 1,5$

### c. Parameter S

Tabel 7. Perbandingan Nilai Parameter S antara simulasi dengan pengukuran

No	Parameter S	Nilai	
		Simulasi	Pengukuran
1	S <sub>11</sub>	-21,644	-18,845
2	S <sub>21</sub>	-36,070	-33,257
3	S <sub>31</sub>	-28,515	-28,051
4	S <sub>41</sub>	-34,457	-32,614
5	S <sub>12</sub>	-34,457	-33,183
6	S <sub>22</sub>	-21,644	-19,810
7	S <sub>32</sub>	-36,070	-33,410
8	S <sub>42</sub>	-28,515	-26,467
9	S <sub>13</sub>	-28,515	-27,328
10	S <sub>23</sub>	-34,457	-32,950
11	S <sub>33</sub>	-21,644	-18,291
12	S <sub>43</sub>	-36,070	-31,371
13	S <sub>14</sub>	-36,070	-31,684
14	S <sub>24</sub>	-28,515	-26,035
15	S <sub>34</sub>	-34,457	-32,148
16	S <sub>44</sub>	-21,644	-19,059

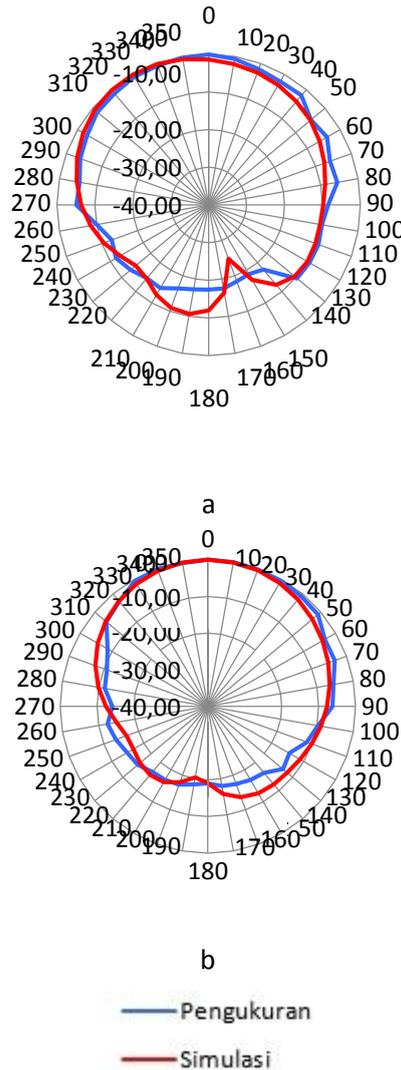
Dari pengukuran parameter S, kita mendapatkan data pengukuran *return loss* dan *mutual coupling* antarantena. Terlihat bahwa *return loss* keempat antena (S<sub>11</sub>, S<sub>22</sub>, S<sub>33</sub>, dan S<sub>44</sub>) memiliki nilai sekitar -19 dB, sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Begitupun dengan *mutual coupling* antarantena, semuanya bernilai  $\leq -20$  dB.

## 7.2 Analisis Pengukuran Impedansi, VSWR, *Bandwidth*, dan Parameter S

Secara keseluruhan, antena sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Namun terlihat adanya sedikit perbedaan antara hasil simulasi dengan realisasi. Hal ini disebabkan karena faktor kepresisian dimensi dan antena saat fabrikasi, di mana tidak benar-benar sama dan akurat dengan ketika simulasi. Kualitas pematrian *port* antena pun berpengaruh pada performansi antena, di mana jika terlalu banyak timah atau pemasangannya tidak rapi akan membuat karakteristik antena menjadi berubah jika dibandingkan dengan simulasi.

## 7.3 Pengukuran Pola Radiasi

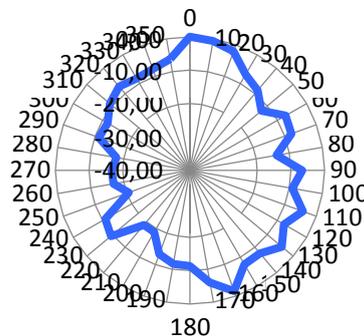
Pola radiasi antena diukur pada daerah medan jauh antena. Jarak antar antena pemancar dengan antena uji adalah 1,5 m. Pengukuran keempat antena dilakukan satu per satu secara bergantian, dan ketika sedang mengukur antena satu, maka *port* ketiga antena lainnya ditutup oleh terminasi 50  $\Omega$  agar tidak ada daya yang keluar dari *port* antena tersebut.



Gambar 8. Pola radiasi pada antena 1. (a) arah elevasi, dan (b) arah azimuth

Pola radiasi yang didapat adalah *unidireksional*. Adanya perbedaan dengan simulasi dikarenakan pengukuran tidak dilakukan di tempat yang bebas pantulan, kesalahan pembacaan level daya terima, dan ketidakakuratan sudut pengarahan antena.

**7.4 Pengukuran Polarisasi**



Gambar 9. Polarisasi antena

Jenis polarisasi didapatkan dengan menggunakan rasio kuat medan elektrik

$$\frac{\sqrt{0,01}}{\sqrt{3,01 \times 10^{-5}}} = \frac{0,1}{0,00549} = 18,2$$

$$= 21,10 \text{ dB}$$

$\sqrt{2,055} \times$

10-7

Antena dikatakan berpolarisasi linier jika *axial ratio*-nya  $\geq 40$  dB, sedangkan jika *axial ratio*-nya  $\leq 3$  dB dikatakan berpolarisasi sirkular. Jika nilai *axial ratio* diantara 3dB dan 40 dB, maka dikatakan berpolarisasi elips. Berdasarkan perhitungan rasio kuat medan elektrik dapat diketahui bahwa antena memiliki nilai *axial ratio* 21,65 dB sehingga tergolong berpolarisasi elips. Jika antena pemancar memiliki polarisasi yang berbeda dengan penerima, maka daya yang dikirimkan tidak diterima dengan maksimal.

### 7.5 Pengukuran Gain

Tabel 8. Perbandingan *gain* simulasi dengan realisasi

Antena uji	Gain Simulasi	Gain Realisasi
1	3.34 dBi	3,306 dBi
2	3.34 dBi	3,428 dBi
3	3.34 dBi	3,38 dBi
4	3.34 dBi	3,315 dBi

*Gain* antena sudah memenuhi spesifikasi, namun terlihat ada perbedaan dengan *gain* yang didapat ketika simulasi. Hal ini disebabkan oleh tempat pengukuran yang tidak bebas dari pantulan, serta kesalahan pembacaan level daya terima.

## 8. Kesimpulan

### 8.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari seluruh proses perancangan dan realisasi ini adalah sebagai berikut:

1. Semua Antena yang dirancang dan direalisasikan dapat bekerja pada rentang frekuensi yang sesuai dengan spesifikasi yaitu 5,180 GHz – 5,220 GHz dengan VSWR  $\leq 1.5$ . *Bandwidth* yang dihasilkan juga memenuhi spesifikasi yaitu antena pertama 92 MHz, antena kedua 96 MHz, antena ketiga 68 MHz, antena keempat 83 MHz. *Mutual Coupling* keempat antena dari hasil pengukuran  $\leq -20$  dB, *Gain* antena pertama 3,306 dBi, antena kedua 3,428 dBi, antena ketiga 3,38 dBi dan antena keempat 3,315 dBi
2. Pola radiasi yang dihasilkan antena adalah *unidireksional*, sedangkan polarisasi yang dihasilkan antena adalah elips.
3. Mengubah konfigurasi peletakkan port menjadi saling bersudut  $90^0$  dapat memperkecil *mutual coupling*. Perubahan jarak antarantena mempengaruhi *mutual coupling* dan *gain*, semakin jauh jarak antarantena, *mutual coupling* semakin kecil dan *gain* semakin besar

### 8.2 Saran

Untuk mendapatkan performansi antena yang cukup baik, maka ada beberapa hal yang bisa dijadikan saran sebagai perkembangan ke depannya, antara lain :

1. Gunakan bentuk atau modifikasi lain pada *patch* untuk mendapat performansi yang lebih baik dan mereduksi dimensi antena secara keseluruhan
2. Fabrikasi antena sebaiknya dilakukan dengan lebih presisi agar didapatkan hasil realisasi antena yang sesuai dengan simulasi. Begitu juga dengan penyolderan port antena, lakukan dengan lebih rapi.
3. Lakukan pengukuran di tempat yang ideal, seperti di *anechoic chamber*. Jika tidak bisa melakukan pengukuran di *anechoic chamber*, cari ruangan lapang yang minim pantulan dari benda-benda sekitar

### Daftar Pustaka

- [1] Balanis, Constantine A. 2005. “*Antenna Theory Analysis and Desain 3<sup>rd</sup> edition*”. USA : Willey InterScience
- [2] Dalli, Anouar, Zenkouar Lahbib, and Bri Seddik. 2012. “*Comparison of CircularSector and Rectangular Patch Antenna Arrays in C-Band*”. Scientific Research
- [3] Fanani, Galih Yogi. 2014. “Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip MIMO 4x4 rectangular patch pada Frekuensi 2,3-2,39 GHz untuk Aplikasi LTE”, Bandung : Telkom University.
- [4] Gamal, Adham and Allam, AN. 2015. “*MIMO Antenna Array Configuration for Minimum Mutual Coupling*”. IJETAE.
- [5] Geier, Jim. 2010. “*Designing and Deploying 802.11n Wireless Network*”. United States : Cisco.
- [6] Nakar, Punit S. 2004. “*Design of a Compact Microstrip Patch Antenna for use in Wireless/Cellular Devices*”. The Florida State University.
- [7] Ozdemir, Mehmet Kemal. 2003. “*Mutual Coupling Effect in Multiantenna Wireless Communication System*”. USA. IEEE.
- [8] Sibille Alain, Oestges Claude, and Zanella, Alberto. 2011. “*MIMO From Theory to Implementation*”. USA : Academic Press.
- [9] Tobing, Robby Gilang Ramadhani, 2012. “Analisa Pengaruh Mutual Coupling terhadap Susunan Dua Antena Mikrostrip Segitiga Samasisi dengan Frekuensi Resonan yang Berbeda (1,5 GHz dan 1,7 GHz)”. Bandung : Institut Teknologi Telkom