



# Antena Mikrostrip Lingkaran untuk Komunikasi MIMO 4×4 pada Frekuensi 15 GHz

Eva Yovita Dwi Utami\*, Jesicha Claudya Novaldy, Andreas Ardian Febrianto

*Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Satya Wacana  
Jl. Diponegoro 52-60 Salatiga, Indonesia*

\*Email Penulis Koresponden: [eva.utami@uksw.edu](mailto:eva.utami@uksw.edu)

## **Abstrak:**

Pada makalah ini disajikan hasil perancangan dan realisasi antena MIMO 4×4 berbentuk mikrostrip *patch* lingkaran *array* 2 elemen yang bekerja pada frekuensi 15 GHz. Antena yang dirancang disimulasikan dengan menggunakan *software* kemudian difabrikasi menggunakan bahan substrat Duroid 5880. Simulasi rancangan antena menghasilkan koefisien refleksi sebesar -22,557 dB, VSWR dengan nilai 1,161, *mutual coupling* bernilai -40,525 dB, lebar pita sebesar 1,482 GHz dan *gain* mencapai 9,69 dB pada frekuensi resonansi 15 GHz. Antena yang direalisasikan berukuran 40×60,64 mm. Dari hasil pengukuran antena yang telah direalisasikan, diperoleh nilai koefisien refleksi terbaik sebesar -26,87 dB, VSWR sebesar 1,095, *bandwidth* sebesar 1,26 GHz dan *gain* sebesar 14,39 dB pada frekuensi kerja 15 GHz.

*This is an open access article under the [CC BY-NC](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license*



## **Kata Kunci:**

*Mikrostrip;*  
*Patch lingkaran;*  
*MIMO;*  
*5G;*  
*Array;*

## **Riwayat Artikel:**

Diserahkan 28 Mei 2021  
Direvisi 18 November 2021  
Diterima 19 November 2021  
Dipublikasi 31 Desember 2021

## **DOI:**

10.22441/incomtech.v11i3.11900

## 1. PENDAHULUAN

Sistem komunikasi seluler generasi kelima (5G) dikembangkan untuk memenuhi tuntutan tersedianya jaringan komunikasi bergerak yang mampu mengakomodasi sejumlah besar perangkat yang terkoneksi di dalamnya. Kemampuan yang diharapkan tersebut antara lain kecepatan yang tinggi, *latency* yang rendah, dan efisiensi penggunaan energi.

Berkembangnya 5G memicu eksplorasi spektrum frekuensi gelombang milimeter (*mm-waves*) untuk menyediakan lebar pita lebih besar daripada yang sekarang tersedia, sehingga kemudian dapat meningkatkan kecepatan data *user*. Spektrum frekuensi terentang dari 24 sampai 86 GHz telah diidentifikasi oleh *World Radio Communications Conference* (WRC-15) yang berfokus pada studi 5G. Para peneliti di seluruh dunia tertarik pada eksplorasi spektrum 15, 17, 28 dan 38, 60 dan 73 GHz yang akan digunakan dalam sistem 5G [1, 2].

Penelitian terkait dengan penggunaan spektrum 15 GHz dilaporkan dalam [3] yang membahas pengujian kinerja *throughput* pada *testbed* 5G di dalam dan di luar ruangan. Kecepatan data juga diteliti pada akses radio arah *downlink* pada 15 GHz dalam [4]. Hasil penelitian yang dilaporkan dalam [1] menyatakan bahwa spektrum frekuensi 15 GHz layak menjadi pilihan jaringan 5G di masa depan karena kemampuannya memberikan jumlah *throughput* yang cukup.

Selain alokasi spektrum, teknologi kunci lainnya untuk memperoleh kecepatan data yang tinggi adalah penggunaan antena MIMO dengan elemen yang banyak. MIMO memanfaatkan diversitas antena untuk memperbaiki kualitas dan keandalan *link* nirkabel yang membantu meminimalkan rugi-rugi propagasi, mengoptimalkan laju data dan meningkatkan kapasitas pada kanal yang sama [5].

Salah satu perangkat penting dalam transmisi di jaringan komunikasi bergerak adalah antena. Untuk mendukung perangkat komunikasi bergerak di sisi terminal pengguna dibutuhkan antena yang berukuran kecil, ringan, dan mudah digabungkan dengan perangkat yang berukuran kecil. Antena mikrostrip merupakan jenis antena yang memenuhi hal tersebut karena murah dalam fabrikasi, bobotnya ringan dan dimensinya relatif kecil [6,7].

Perancangan antena mikrostrip untuk komunikasi bergerak telah banyak dilakukan sebelumnya. Pada [8] dibahas perancangan antena mikrostrip dengan *patch* yang dicatu oleh sepasang *probe* berbentuk L antisimetris yang bekerja pada frekuensi 1580–2750 MHz. Pada [9], dirancang antena mikrostrip 4×6 *Buttler matrix multibeam* pada frekuensi 27,5 dan 28,5 GHz dengan *gain* 11 dB. Pada [10] disimulasikan rancangan antena MIMO 4×4 susunan persegi dan sirkular pada frekuensi 15 GHz dengan hasil simulasi lebar pita sebesar 2,3 GHz pada frekuensi 14,3–15,6 GHz dengan koefisien refleksi minimum -23,91 dB, sedangkan *patch* sirkular sebesar 2,8 GHz pada frekuensi 14,5 – 17,3 GHz dengan koefisien refleksi minimum -19,19 dB. Nilai *gain* maksimum untuk *patch* persegi dan sirkular sebesar 10,30 dB dan 9,95 dB, sedangkan nilai *mutual coupling* sebesar -24,75 dB. Sementara itu pada penelitian [11] dilakukan perancangan antena MIMO 2×2 *array rectangular patch* dengan U-Slot untuk 5G. Hasil yang didapatkan adalah rancangan antena dengan lebar-pita 1 GHz dan rentang frekuensi kerja 14,4 – 15,4 GHz dengan koefisien refleksi minimum yang didapat sebesar -18,69 dB, dan *gain* yang dicapai sebesar 9,20 dBi. Pada makalah [12] dijelaskan perancangan antena *array slot dipole* pada 28 GHz, dengan *directivity* yang diperoleh 8-10,5 dBi, efisiensi radiasi -2 dB sampai -1,2 dB. Penelitian [13] menjelaskan perancangan antena MIMO 2×4 5G pada frekuensi 28 GHz. Dari berbagai penelitian tersebut, makalah ini mengacu terutama pada penelitian [10] dan [11], dengan hasil rancangan antena pada frekuensi 15 GHz yang baik namun belum menyajikan hasil realisasi antena dan pengukuran kinerjanya. Oleh karena itu dalam makalah ini, disajikan hasil simulasi dan juga hasil pengukuran antena bentuk *patch* lingkaran dalam konfigurasi MIMO 4×4 pada frekuensi 15 GHz.

## 2. METODE

### 2.1 Spesifikasi dan Bahan Antena

Spesifikasi antena yang dirancang ditunjukkan pada Tabel 1. Pemilihan frekuensi kerja didasarkan pada kajian pustaka yang telah dijelaskan pada bagian

sebelumnya. Nilai koefisien refleksi dan VSWR mengacu pada desain antenna yang baik dalam referensi [6, 7]. Menurut [14] *bandwidth* sistem 5G diharapkan dapat melebihi standar sebelumnya yaitu sampai 1 GHz.

Tabel 1. Spesifikasi Antena

Parameter	Spesifikasi
Frekuensi kerja (GHz)	15
Koefisien refleksi (dB)	<- 9,54
VSWR	< 2
Gain (dB)	> 9
Bandwidth (GHz)	> 1
Mutual Coupling (dB)	< -20

Bahan yang digunakan untuk realisasi antenna adalah Duroid 5880 dengan karakteristik bahan tertera pada Tabel 2. Bahan ini termasuk dalam kategori material yang tipis dan memiliki konstanta dielektrik yang rendah agar diperoleh efisiensi radiasi yang baik [7].

Tabel 2. Karakteristik bahan

Karakteristik bahan	Nilai
Permitivitas relatif substrat	2,2
Ketebalan substrat	1,57 mm

## 2.2 Penghitungan Dimensi Patch Antena

Bentuk *patch* antenna yang dirancang adalah lingkaran. Dimensi lingkaran tergantung pada jari-jarinya yang dihitung dengan persamaan berikut [6].

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

dengan  $a$  adalah jari-jari lingkaran (mm),  $h$  adalah ketebalan substrat (mm),  $\epsilon_r$  adalah permitivitas relatif substrat, dan  $F$  adalah fungsi elemen peradiasi. Untuk menentukan elemen peradiasi, dilakukan perhitungan:

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

dengan  $f$  adalah frekuensi kerja (GHz) dan  $\epsilon_r$  adalah permitivitas dielektrik relatif substrat.

Pada antenna mikrostrip *patch* lingkaran, luas substrat mengikuti luas *ground plane* yang panjang dan lebar minimumnya dihitung sebagai berikut

$$W_g = 6h + \frac{\pi}{2} a \quad (3)$$

$$L_g = 6h + 2a \quad (4)$$

dengan  $W_g$  adalah lebar bidang pentanahan (mm),  $L_g$  adalah panjang bidang pentanahan (mm), dan  $h$  adalah ketebalan tembaga (mm).

### 2.3. Penghitungan Dimensi Saluran Pencatu

Teknik pencatuan yang digunakan pada perancangan ini adalah teknik pencatuan *microstrip line feed*. Teknik pencatuan *microstrip line feed* dirasa lebih mudah untuk dirancang, yaitu dengan menambahkan saluran pencatu pada *patch* ke tepi substrat atau bisa dikatakan menambahkan *patch* yang menghubungkan konektor dan *patch* antenna. Penghitungan dimensi pencatuan ini menggunakan persamaan berikut. Persamaan mencari lebar saluran pencatu [15] adalah:

$$\frac{W_f}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A}-2} \quad (5)$$

dengan  $W_f$  adalah lebar saluran pencatu (mm) dan  $h$  adalah tebal substrat (mm). Nilai  $A$  adalah sebagai berikut [15].

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1}} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r}\right) \quad (6)$$

dengan  $Z_0$  adalah impedansi karakteristik saluran transmisi ( $50 \Omega$ ) dan  $\epsilon_r$  adalah permitivitas relatif substrat.

Kemudian persamaan untuk menentukan panjang saluran pencatu adalah sebagai berikut[15];

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} \quad (7a)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7b)$$

$$L_f = \frac{\lambda_g}{4} \quad (7c)$$

dengan  $c$  adalah kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$ ) (m/s),  $f_r$  adalah frekuensi resonansi (Hz),  $\epsilon_r$  adalah permitivitas relatif substrat,  $L_f$  adalah panjang saluran pencatu (m),  $\lambda_0$  adalah panjang gelombang di udara (m), dan  $\lambda_g$  adalah panjang gelombang dalam saluran pencatu (m).

### 2.4. Penghitungan Spasi Antena MIMO

Untuk isolasi yang baik antara elemen antenna, diperlukan spasi minimum antar elemen MIMO dan antar elemen array. Jarak antar antenna elemen MIMO dinotasikan dengan  $S$  dihitung sebagai berikut.:

$$S = \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

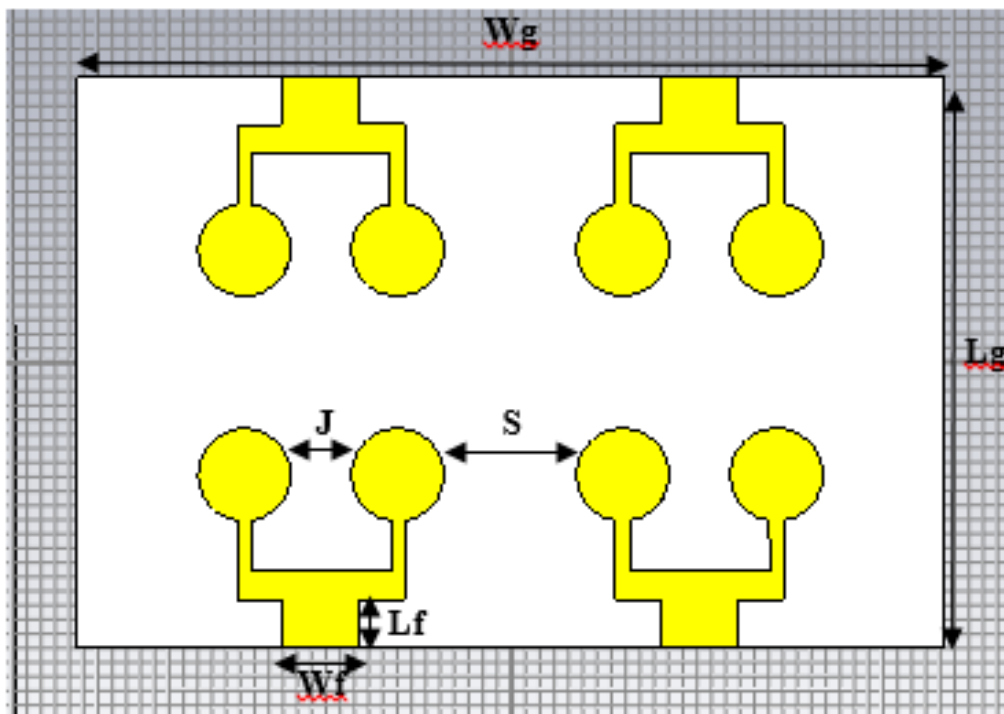
Jarak antar *patch* elemen *array* dinyatakan dalam  $J$  dengan penghitungan sebagai berikut.

$$J = \frac{\lambda}{4} \quad (9)$$

dengan  $\lambda$  adalah panjang gelombang (m) di udara, karena *mutual coupling* terutama diatributkan untuk medan yang berada pada antarmuka dielektrik udara.

## 2.5. Simulasi Rancangan Antena

Konfigurasi antena yang dirancang terdiri dari empat elemen yang dicatu secara terpisah, sehingga bisa mendukung empat sinyal ( $M=4$ ) pada pemancar dan empat sinyal ( $N=4$ ) pada penerima. Setiap elemen yang dicatu pada *port* 1 sampai *port* 4 memiliki konfigurasi *array* dua elemen. Dimensi antena dihitung berdasarkan persamaan-persamaan yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, kemudian hasil penghitungan tersebut dimasukkan dalam *software* simulasi CST Microwave Studio. Konfigurasi antena yang dirancang dan disimulasikan pada CST ditunjukkan pada [Gambar 1](#).



Gambar 1. Rancangan Antena pada Simulasi

Rancangan antena dijalankan dalam simulasi untuk memperoleh grafik kinerja parameter antena. Parameter kinerja antena yang diperoleh berupa VSWR, koefisien refleksi, *mutual coupling*, *gain* dan pola radiasi. Namun dalam simulasi rancangan antena dengan dimensi berdasarkan hasil penghitungan belum menghasilkan parameter kinerja antena sesuai spesifikasi sehingga perlu dilakukan optimasi. Optimasi dilakukan dengan mengubah-ubah dimensi antena kemudian simulasi dijalankan lagi untuk melihat perubahan parameter kinerjanya sampai diperoleh hasil simulasi yang paling baik yaitu yang mendekati parameter kinerja sesuai spesifikasi. [Tabel 3](#) menunjukkan dimensi antena yang dirancang dari hasil penghitungan Persamaan (1) sampai dengan Persamaan (9) dan dimensi setelah proses optimasi. Pada saat proses optimasi terjadi perubahan pada beberapa ukuran misalnya radius *patch* sehingga ukuran antena secara keseluruhan menjadi lebih besar daripada hasil penghitungan. Optimasi terbaik menghasilkan dimensi antena secara keseluruhan sebesar 40×60,64 mm.

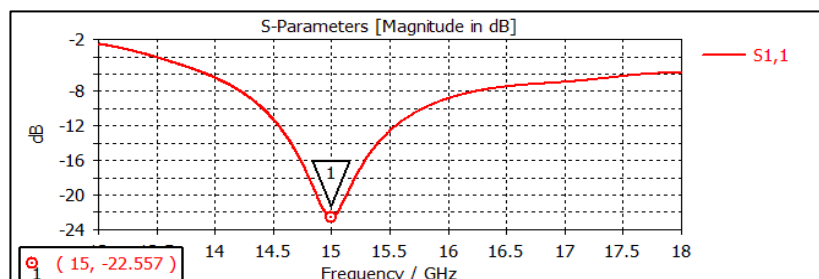
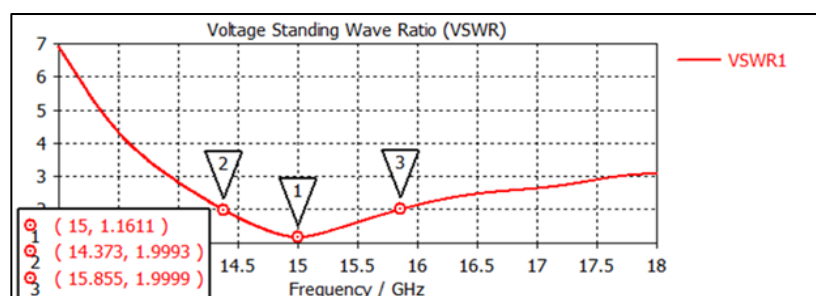
Tabel 3. Dimensi Antena Mikrostrip Berdasarkan Penghitungan dan Hasil Optimasi

Notasi	Dimensi Antena		Keterangan notasi
	Berdasar Penghitungan (mm)	Hasil Optimasi (mm)	
$a$	3,28	3,28	Jari-jari <i>patch</i> lingkaran
$W_f$	4,09	4,09	Lebar saluran pencatu
$L_f$	3,37	3,37	Panjang saluran pencatu
$W_s$	60,64	60,64	Lebar substrat
$L_s$	40	40	Panjang substrat
$W_g$	60,64	60,64	Lebar <i>groundplane</i>
$L_g$	40	40	Panjang <i>groundplane</i>
$S$	9,18	9,18	Jarak antar elemen antena MIMO
$J$	4,18	4,18	Jarak antar <i>patch</i> elemen <i>array</i>

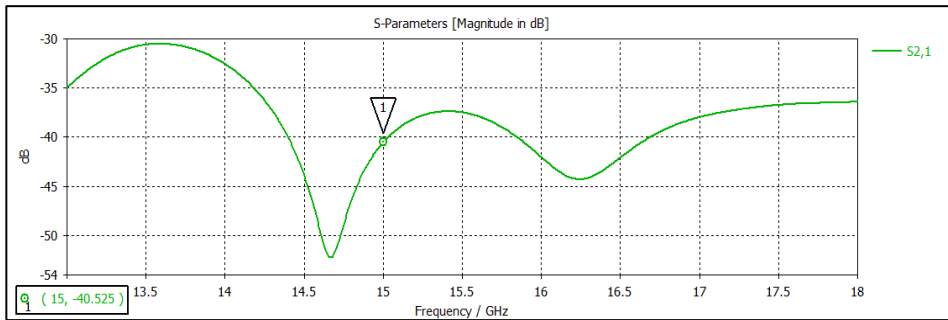
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Simulasi

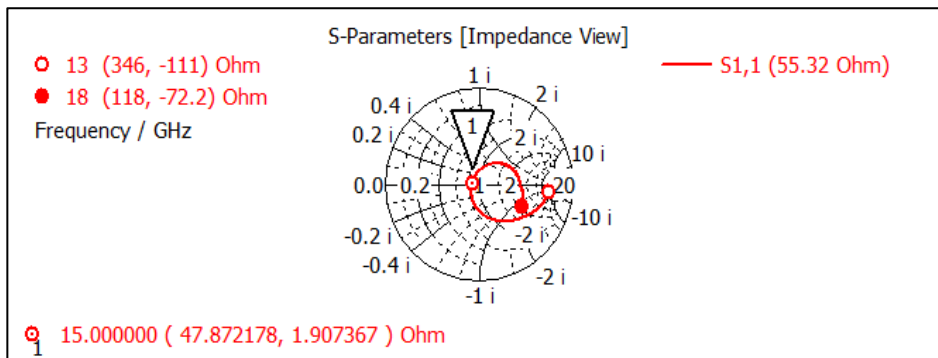
Rancangan antena pada simulasi menghasilkan parameter kinerja antena seperti ditunjukkan pada Gambar 2 sampai dengan Gambar 8. Gambar 2 menunjukkan pada frekuensi resonansi 15 GHz antena memiliki nilai koefisien refleksi yang dalam simulasi dinyatakan sebagai parameter  $S_{11}$  sebesar -22,557 dB. Gambar 3 memperlihatkan nilai VSWR sebesar 1,161 (titik 1) yaitu pada frekuensi 15 GHz, dan jika diamati rentang dari titik 2 pada frekuensi 14,373 GHz hingga titik 3 (frekuensi 15,855 GHz) diketahui *bandwidth* yang didapatkan sebesar 1,482 GHz. Gambar 4 memperlihatkan nilai *mutual coupling* sebesar -40,525 dB dan Gambar 5 menunjukkan nilai impedansi sebesar  $47,87 + j1,91 \Omega$ . *Gain* yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 6 sebesar 9,69 dB. Pada Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan pola radiasi antena yang bersifat direksional.

Gambar 2. Grafik Parameter  $S_{11}$  Rancangan Antena pada Simulasi

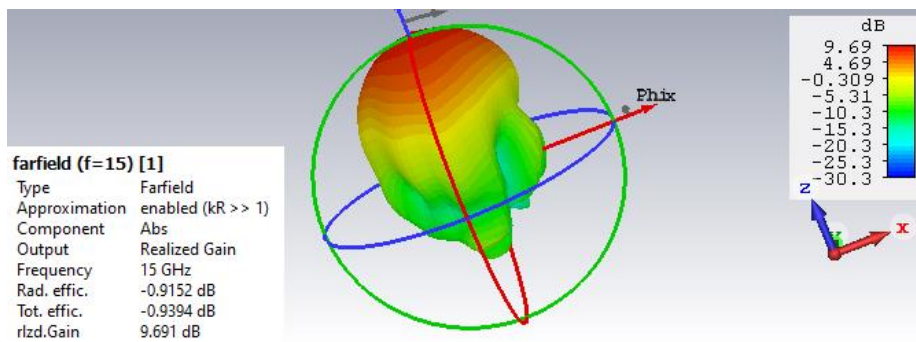
Gambar 3. Grafik VSWR Rancangan Antena pada Simulasi



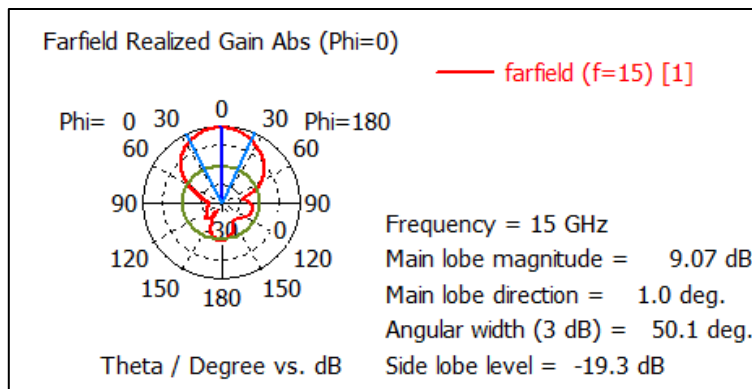
Gambar 4. Grafik *Mutual Coupling* Rancangan Antena pada Simulasi



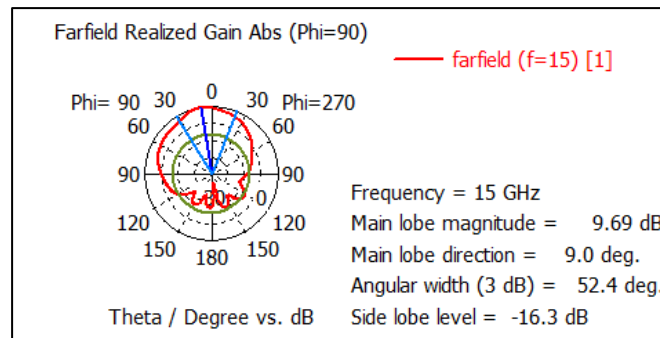
Gambar 5. Grafik Impedansi Rancangan Antena pada Simulasi



Gambar 6. Grafik *Gain* Rancangan Antena pada Simulasi



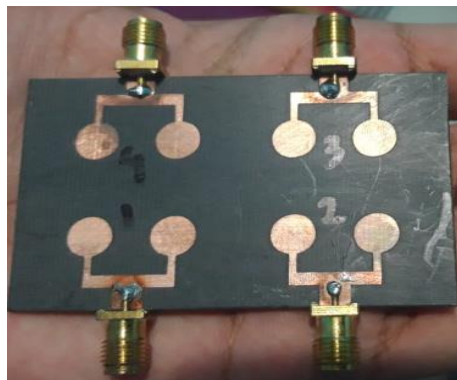
Gambar 7. Pola Radiasi Sudut Azimuth Rancangan Antena pada Simulasi



Gambar 8. Pola Radiasi Sudut Elevasi Rancangan Antena pada Simulasi

### 3.2 Hasil Pengujian Antena yang Telah Difabrikasi

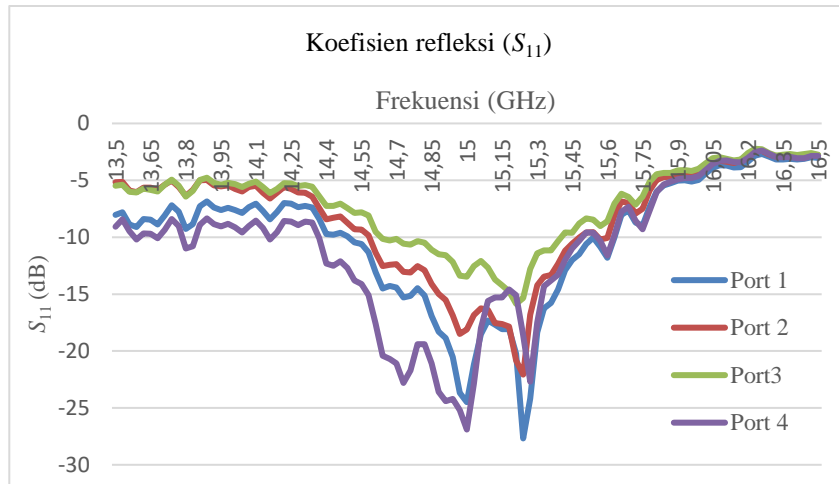
Setelah diperoleh rancangan antenna hasil simulasi dan optimasi yang memberikan kinerja parameter antenna yang paling mendekati spesifikasi, maka rancangan tersebut direalisasikan dengan bahan substrat Roger Duroid 5880. Antena yang telah dicetak dapat dilihat pada Gambar 9. Kemudian dilakukan pengujian terhadap antenna yang telah direalisasikan tersebut. Parameter kinerja yang diukur dan disajikan adalah parameter  $S_{11}$  atau koefisien refleksi, *mutual coupling*, *gain* dan pola radiasi.



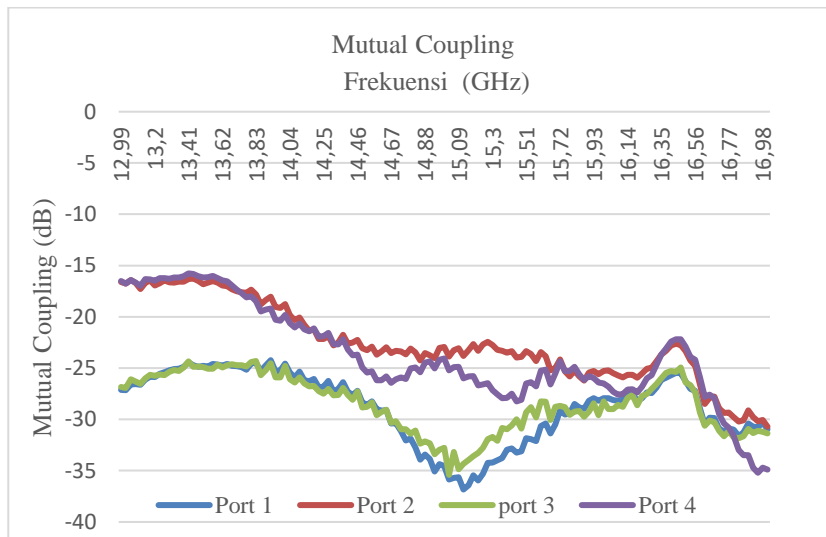
Gambar 9. Hasil Fabrikasi Antena mikrostrip MIMO

Gambar 10 merupakan grafik hasil pengujian antenna untuk parameter  $S_{11}$  atau koefisien refleksi dalam dB. Pada frekuensi resonansi 15 GHz antenna menghasilkan nilai  $S_{11}$  terbaik sebesar -26,87 dB yaitu pada *port* keempat. Nilai pada setiap *port* dapat dilihat pada Tabel 4 dan kesemuanya telah memenuhi parameter  $S_{11}$  kurang dari -9,54 dB. Dengan memperhatikan nilai frekuensi yang menghasilkan  $S_{11}$  kurang dari -9,54 dB diperoleh *bandwidth* 0,84 GHz sampai dengan 1,26 GHz, sehingga dapat diketahui bahwa nilai *bandwidth* belum terpenuhi pada antenna *port* ketiga, sementara tiga *port* yang lain telah memenuhi spesifikasi. Gambar 11 menunjukkan nilai *mutual coupling* pada setiap *port* yang menunjukkan bahwa isolasi sebesar < -20 dB dapat dicapai oleh keempat antenna di atas frekuensi 14,07 GHz sampai pengukuran pada frekuensi 18 GHz. Antena pada masing-masing *port* memiliki nilai *mutual coupling* pada frekuensi 15 GHz sebesar -34,55 dB, -22,95 dB, -32,74 dB dan -24,06 dB, sehingga pada frekuensi kerja dan pada rentang *bandwidth*, nilai *mutual coupling* telah memenuhi spesifikasi.





Gambar 10. Grafik Hasil Pengujian Koefisien Refleksi ( $S_{11}$ )



Gambar 11. Grafik Hasil Pengujian *Mutual Coupling*

Tabel 4. Parameter Kinerja Antena Hasil Fabrikasi

Parameter	Antena pada Port ke-			
	I	II	III	IV
Koefisien Refleksi (dB)	-24,48	-18,11	-13,48	-26,87
VSWR	1,127	1,284	1,538	1,095
Gain (dB)	14,39	14,39	14,39	14,39
Impedansi ( $\Omega$ )	47,88 + j1,91	47,35 + j11,9	41,66 + j17,95	45,66 + j0,02
Rentang Frekuensi (GHz)	14,4 – 16,63	14,48 – 15,6	14,61-15,45	14,37-15,63
<i>Mutual Coupling</i> (dB)	-34,55	-22,95	-32,76	-24,06
Bandwidth (GHz)	1,23	1,12	0,84	1,26

Pengukuran *gain* menggunakan *Function Generator* dan *Spectrum Analyzer*. *Spectrum analyzer* disambungkan dengan antena uji (antena yang akan diukur) sehingga antena uji merupakan antena penerima (*Rx*) yang akan menerima daya dari antena pemancar (*Tx*), yaitu antena acuan yang disambungkan dengan *function generator*. Daya terima antena ini dicatat sebagai nilai  $P_{r2}$ . Kemudian kedua antena

dipertukarkan letaknya sehingga antenna acuan berlaku sebagai antenna penerima dan daya yang terukur dicatat sebagai nilai  $P_{r1}$ . *Gain* antenna uji kemudian dihitung dengan

$$G_2[dB] = P_{r2}[dBm] - P_{r1}[dBm] + G_1[dB] \quad (10)$$

dengan  $G_2$  adalah *Gain* antenna uji (dB),  $G_1$  merupakan *Gain* antenna acuan (dB),  $P_{r2}$  adalah daya yang diterima oleh antenna uji (dBm) dan  $P_{r1}$  merupakan daya yang diterima oleh antenna acuan (dBm).

Dari hasil pengukuran diperoleh:

Daya yang diterima antenna uji  $P_{r2} = -38,50$  dBm

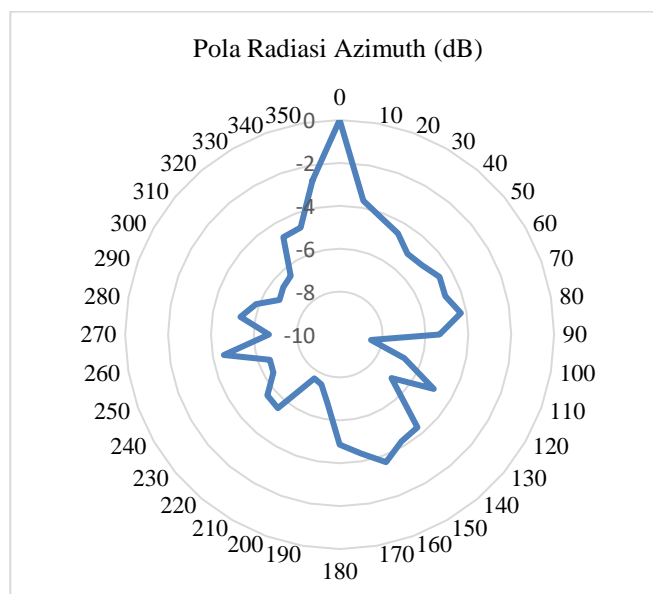
Daya yang diterima antenna acuan  $P_{r1} = -39,79$  dBm

Gain antenna acuan  $G_1 = 13,1$  dB

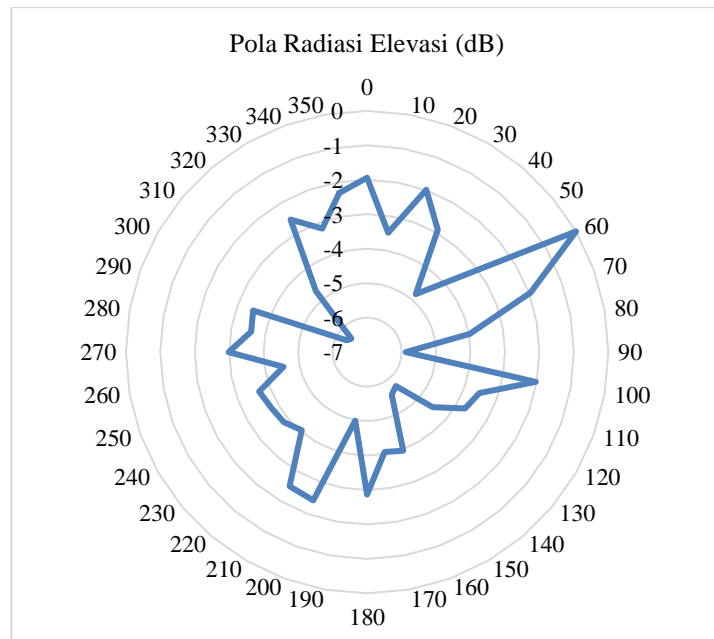
Maka

$$G_2 = P_{r2} - P_{r1} + G_1 = -38,50 - (-39,79) + 13,1 = 14,39 \text{ dB}$$

Pengujian pola radiasi pada antenna menggunakan *spectrum analyzer* dan *function generator*. *Function generator* digunakan untuk menghasilkan gelombang dengan frekuensi resonansi. Pada *function generator* disambungkan dengan antenna pemancar yang telah diatur memiliki frekuensi resonansi yang sama dengan antenna hasil perancangan. Pola radiasi diukur pada sudut azimuth dan sudut elevasi. Antenna penerima diputar dari posisi  $0^\circ$  sampai  $350^\circ$  dengan interval  $10^\circ$ . Hasil pengukuran pola radiasi antenna mikrostrip pada sudut azimuth dan elevasi dalam nilai dB ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13. Dari Gambar 12 ditunjukkan bahwa antenna memiliki pola radiasi direksional, karena antenna bekerja efektif pada sudut dan arah tertentu. Sementara untuk pola elevasi meskipun diperoleh pola direksional namun terdapat *minor lobe* yang cukup besar.



Gambar 12. Hasil Pengujian Pola Radiasi Antena pada Sudut Azimuth



Gambar 13. Hasil Pengujian Pola Radiasi Antena pada Sudut Elevasi

Dari hasil simulasi dan pengujian antenna yang ditunjukkan pada Tabel 5, antara nilai hasil simulasi dan pengujian tidak menunjukkan perubahan hasil yang jauh berbeda. Nilai hasil simulasi jika dibandingkan dengan [10] untuk antenna lingkaran tanpa slot, diperoleh nilai koefisien refleksi dan *mutual coupling* yang lebih baik, tetapi belum dapat dicapai nilai *gain* dan *bandwidth* yang lebih baik. Nilai-nilai yang dihasilkan pada setiap parameter menunjukkan antenna dapat bekerja dengan baik pada frekuensi 15 GHz. Namun demikian untuk dapat mengakomodasi spektrum yang lebar, rancangan antenna masih dapat ditingkatkan *bandwidth*-nya misalnya dengan menambahkan *slot* pada *patch* untuk meningkatkan *bandwidth*.

Tabel 5. Perbandingan Nilai Parameter Antena Hasil Simulasi dan Hasil Pengujian.

Parameter	Nilai hasil simulasi	Nilai Hasil Pengujian
Koefisien Refleksi (dB)	-22,557	-26,87
VSWR	1,1611	1,095
Gain (dB)	9,69	14,39
Impedansi ( $\Omega$ )	47,87 + j1,91	45,66 + j0,02
Rentang Frekuensi (GHz)	14,373 – 15,855	14,37-15,63
Mutual Coupling (dB)	-40,525	-24,06
Bandwidth (GHz)	1,482	1,26

#### 4. KESIMPULAN

Perancangan dan realisasi antenna MIMO 4x4 berbentuk mikrostrip *patch* lingkaran *array* dua elemen telah disajikan dan dibahas. Rancangan antenna dalam simulasi menghasilkan koefisien refleksi sebesar -22,557 dB, VSWR dengan nilai 1,161, *mutual coupling* -40,525 dB lebar pita sebesar 1,482 GHz dan *gain* mencapai 9,69 dB pada frekuensi resonansi 15 GHz. Kemudian untuk hasil yang didapat dari pengujian antenna yang telah direalisasikan pada masing-masing parameter yaitu koefisien refleksi terbaik mencapai -26,87 dB, VSWR sebesar 1,095, *mutual coupling* -34,55 dB, lebar pita sebesar 1,26 GHz, dan *gain* mencapai 14,39 dB.

Kemudian untuk pola radiasi, antenna menghasilkan pola radiasi bersifat direksional. Antena yang direalisasikan berukuran 40×60,64 mm.

## REFERENSI

- [1] F. Qamar, T. Abbas, M. N. Hindia, K. Bin Dimiyati, K. A. Bin Noordin, and I. Ahmed, "Characterization of MIMO propagation channel at 15 GHz for the 5G spectrum," *2017 IEEE 13th Malaysia Int. Conf. Commun. MICC 2017*, vol. 2017-Novem, no. March 2018, pp. 265–270, 2018, doi: 10.1109/MICC.2017.8311770.
- [2] A. Osseiran *et al.*, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6815890.
- [3] K. Tateishi *et al.*, "Experimental evaluation on 5G radio access employing multi-user MIMO at 15 GHz band," in *2017 14th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, 2017, pp. 951–956, doi: 10.1109/CCNC.2017.7983261.
- [4] D. Kurita *et al.*, "Indoor and Outdoor Experiments on 5G Radio Access Using Distributed MIMO and Beamforming in 15 GHz Frequency Band," in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/GLOCOMW.2016.7848932.
- [5] J. G. Andrews *et al.*, "What will 5G be?," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014, doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design*, 3rd ed. New Jersey: John Willey and Son, 2005.
- [7] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. USA: John Willey and Son, 2012.
- [8] K. M. Mak, H. W. Lai, and K. M. Luk, "A 5G Wideband Patch Antenna with Antisymmetric L-shaped Probe Feeds," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 2, pp. 957–961, 2018, doi: 10.1109/TAP.2017.2776973.
- [9] M. Ansari, H. Zhu, N. Shariati, and Y. J. Guo, "Compact Planar Beamforming Array with Endfire Radiating Elements for 5G Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 11, pp. 6859–6869, 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2925179.
- [10] F. W. Ardianto, N. M. A., and B. Syihabuddin, "Analisis Simulasi Antena MIMO 4 4 Susunan Persegi dan Sirkular pada Frekuensi 15 GHz," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 7, no. 2, pp. 174–182, 2018, doi: 10.22146/jnteti.v7i2.420.
- [11] K. Jones A.S., L. Olivia N., and B. Syihabuddin, "Perancangan Antena MIMO 2×2 Array Rectangular Patch dengan U-Slot untuk Aplikasi 5G," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 6, no. 1, 2017, doi: 10.22146/jnteti.v6i1.299.
- [12] N. O. Parchin, R. A. Abd-Alhameed, and M. Shen, "Design of Low Cost FR4 Wide-Band Antenna Arrays for Future 5G Mobile Communications," *2019 Int. Symp. Antennas Propagation, ISAP 2019 - Proc.*, pp. 7–9, 2019.
- [13] Y. Rahayu, J. Wijaya, and E. Syafitri, "Characteristic mimo 2 × 4 antenna for 5G communication system," *Telkonnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 16, no. 4, pp. 1508–1514, 2018, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v16i4.8377.
- [14] 3GPP Global Initiative, "3GPP system standards heading into the 5G era." [https://www.3gpp.org/news-events/1614-sa\\_5g](https://www.3gpp.org/news-events/1614-sa_5g).
- [15] S. M. Wentworth, *Fundamentals of Electromagnetic with Engineering Application*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2005.