

Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip Persegi Panjang MIMO pada Frekuensi 15 GHz

Adiono Dwi Satya¹, Eva Yovita Dwi Utami², Andreas A. Febrianto³

Program Studi Teknik Elektro,
Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer,
Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga
¹612015017@student.uksw.edu, ²eva.utami@uksw.edu, ³andreas.febrianto@uksw.edu

Abstrak

Pada komunikasi nirkabel generasi kelima, penggunaan spektrum frekuensi baru yang lebih tinggi dan pemanfaatan teknik MIMO menjadi teknologi kunci untuk memenuhi kebutuhan *bandwidth* dan *data rate* yang tinggi. Salah satu kandidat frekuensi untuk 5G adalah 15 GHz. Pada makalah ini dirancang antena mikrostrip berbentuk persegi panjang *array* dua elemen pada struktur MIMO empat *port* dengan frekuensi kerja 15 GHz. Antena disimulasikan dan direalisasikan menggunakan bahan substrat *Duroid* yang memiliki nilai permitivitas relatif sebesar 2,2 dan ketebalan 1,57 mm, sedangkan *patch* peradiasi dan *ground plane* menggunakan bahan tembaga. Rancangan antena pada *software* simulasi memberikan hasil terbaik untuk koefisien refleksi sebesar -25,639 dB, VSWR bernilai 1,11, *mutual coupling* mencapai -30,955 dB, *gain* sebesar 8,59 dB pada frekuensi 15 GHz, dan *bandwidth* sebesar 1,3 GHz. Hasil pengukuran antena yang telah difabrikasi menunjukkan nilai koefisien refleksi sebesar -36,592 dB, VSWR bernilai 1,03, *mutual coupling* sebesar -28,137 dB, dan *gain* sebesar 13,18 dB pada frekuensi 15 GHz. *Bandwidth* terukur mencapai 2,69 GHz.

Kata kunci: mikrostrip, 5G, MIMO, antena

Abstract

In the fifth generation of wireless communication, the use of new higher frequency spectrum and the use of MIMO techniques become the key technologies to accommodate the needs of high bandwidth and data rates. One of the frequency candidates for 5G is 15 GHz. In this paper, a rectangular microstrip antenna with 2-element array is designed on a 4-port MIMO structure with an operation frequency of 15 GHz. The antenna is simulated and realized using Duroid substrate material which has a relative permittivity value of 2.2 and a thickness of 1.57 mm, while the radiating patch and ground plane using copper material. The antenna design on the simulation software gives the best results for reflection coefficient of -25.639 dB, VSWR of 1.11, a mutual coupling of -30.955 dB, gain of 8.59 dB at a frequency of 15 GHz and bandwidth of 1.3 GHz. The measurement results of fabricated antenna show that reflection coefficient is -36.592 dB, VSWR value is 1.03, mutual coupling is -28.137 dB, and maximum gain reaches 13.18 dB at 15 GHz. The measured bandwidth reaches 2.69 GHz.

Keywords: microstrip, 5G, MIMO, antenna

1. Pendahuluan

Dengan pesatnya penggunaan komunikasi nirkabel dalam berbagai bidang, standar komunikasi bergerak generasi kelima atau 5G bertumbuh untuk memenuhi kebutuhan

jaringan yang sangat tinggi. Perkembangan ini memacu penelitian perancangan antenna untuk mengakomodasi tuntutan teknologi 5G. Teknologi kunci 5G yang berkaitan dengan antenna adalah penggunaan spektrum frekuensi yang lebih tinggi dan teknik MIMO. Spektrum frekuensi bukan hanya pada daerah frekuensi yang sudah banyak dialokasikan untuk komunikasi bergerak, tetapi juga eksplorasi frekuensi di atas 10 GHz. Hal ini didasarkan pada spektrum frekuensi yang 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]. Penggunaan spektrum frekuensi yang tinggi ini dipertimbangkan 5G dalam meningkatkan lebar pita [3]. Kunci teknologi lainnya adalah penggunaan teknik *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) untuk memperbaiki efisiensi penggunaan spektral dan meningkatkan kapasitas kanal tanpa penambahan daya transmisi [3],[4]. MIMO merupakan sistem yang terdiri dari sejumlah antenna pengirim dan penerima pada perangkat *transceiver* sistem komunikasi nirkabel, dengan setiap antenna mengirimkan data secara independen dan simultan [5]. Dengan ukuran perangkat komunikasi bergerak yang semakin kecil maka penelitian perancangan antenna berfokus pada pengembangan jenis antenna mikrostrip. Teknik antenna MIMO sebelumnya juga menjadi teknologi kunci pada LTE/4G dan juga *Wireless LAN*. Pengembangan penelitian antenna mikrostrip MIMO sebelumnya untuk LTE pada frekuensi 2,3 GHz telah diteliti pada [6] dengan bentuk *patch* persegi panjang. Perancangan antenna MIMO dengan *patch* berbentuk lingkaran pada frekuensi 2,35 GHz untuk LTE dilaporkan pada [7]. Sementara itu untuk Perancangan Antena MIMO untuk WLAN diteliti pada [8]. Dalam penelitian tersebut dilaporkan peningkatan penerimaan kuat sinyal dan kecepatan penerimaan data pada perangkat yang menggunakan hasil rancangan antenna MIMO.

Pada pengembangan antenna mikrostrip MIMO untuk teknologi 5G telah dilakukan penelitian simulasi perancangan antenna dengan bentuk *patch* persegi dan lingkaran pada [9], dengan MIMO 4×4, yaitu 4 antenna pengirim dan 4 antenna penerima. Setiap satu antenna merupakan antenna larik (*array*) 2 elemen. Bentuk *patch* lingkaran yang disimulasikan tersebut, kemudian dikembangkan dan direalisasikan dalam [10] sehingga hasil realisasi antenna dapat diukur kinerjanya. Dalam makalah ini hasil penelitian [9] dengan *patch* bentuk persegi panjang akan disimulasikan dan juga difabrikasi sehingga dapat dilaporkan kinerja antenna hasil fabrikasi.

2. Dasar Teori

2.1. Antena Mikrostrip *Patch* Persegi Panjang

Antena mikrostrip merupakan tipe khusus dari antenna tercetak yang cara fabrikasinya mirip dengan *PCB* untuk rangkaian elektronik pada umumnya. Antena mikrostrip tersusun atas *patch* sebagai elemen peradiasi yang terbuat dari logam, berada di atas substrat, dan *groundplane* terdapat di bawah substrat [11].

Patch berbentuk *rectangular* atau persegi panjang adalah bentuk yang paling banyak dipakai dan paling mudah dianalisis. Penghitungan untuk merancang dan menentukan dimensi antenna mikrostrip berbentuk persegi panjang, dilakukan dengan langkah-langkah berikut [12].

Menentukan lebar *patch* (W_p):

$$W_p = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

dengan W_p adalah lebar bidang peradiasi (mm); c adalah kecepatan gelombang di udara sebesar 3×10^8 m/s, f_o adalah frekuensi kerja (Hz) ϵ_r adalah permitivitas relatif bahan substrat.

Untuk menentukan panjang *patch* (L_p) diperlukan parameter ΔL yang merupakan pertambahan panjang akibat adanya *fringing effect*. Pertambahan panjang (ΔL) tersebut dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta L = 0,412 \cdot h \frac{(\epsilon_{reff}+0,3)\left(\frac{W_p}{h}+0,264\right)}{(\epsilon_{reff}-0,3)\left(\frac{W_p}{h}+0,8\right)} \quad (2)$$

dengan h adalah tebal substrat, dan ϵ_{eff} adalah permitivitas relatif efektif yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+12\frac{h}{W_p}}} \right) \quad (3)$$

dan panjang *patch* efektif dirumuskan sebagai berikut:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_o\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4)$$

sehingga panjang *patch* L_p diberikan oleh persamaan berikut:

$$L_p = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

dengan ΔL adalah pertambahan panjang karena *fringing effect* (mm); L_{eff} adalah panjang peradiasi efektif (mm); dan L_p adalah panjang peradiasi (mm).

Untuk menentukan panjang dan lebar dimensi minimal *ground plane* digunakan Persamaan (6) dan Persamaan (7), sebagai berikut:

$$L_g \geq (6 \times h) + L_p \quad (6)$$

$$W_g \geq (6 \times h) + W_p \quad (7)$$

dengan L_g adalah panjang *ground plane* (mm) dan W_g merupakan lebar *ground plane* (mm).

Teknik pencatutan yang digunakan pada perancangan ini adalah teknik pencatutan *microstrip line feed*. Untuk menentukan lebar pencatut digunakan Persamaan (8)-(9), dan untuk panjang pencatut digunakan Persamaan (10)-(12), sebagai berikut:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1}} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (8)$$

$$\frac{W_f}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A}-2} \quad (9)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} \quad (10)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

$$L_f = \frac{\lambda_g}{4} \quad (12)$$

dengan A adalah konstanta untuk mencari lebar saluran pencatut, W_f adalah lebar saluran pencatut (mm), L_f adalah panjang saluran pencatut (mm), Z_0 adalah impedansi saluran catu (Ω) dan λ_0 adalah panjang gelombang di udara (m) dan λ_g adalah panjang gelombang pada bahan (m)

2.2. Antena MIMO

Multiple Input Multiple Output (MIMO) merupakan teknologi komunikasi nirkabel dengan menggunakan lebih dari satu antena pemancar dan penerima untuk mengirim dan menerima banyak data pada waktu yang bersamaan. Pada antena mikrostrip, teknik MIMO dirancang dengan menempatkan *patch* antena MIMO pada *port*/saluran pencatu yang berbeda pada *board* yang sama. Dengan menggunakan MIMO, maka perlu dihitung jarak antara *patch* pada *port* satu dengan *port* sebelahnya, menggunakan Persamaan (13) berikut [9].

$$s = \frac{\lambda}{2} \tag{13}$$

dengan λ adalah panjang gelombang di udara dalam mm; s adalah jarak antar *patch* pada *port* yang berbeda (mm).

3. Perancangan Antena

3.1. Bahan dan Spesifikasi Antena

Antena yang dirancang merupakan jenis antena mikrostrip, menggunakan bahan substrat *Duroid* 5880. Bahan ini memiliki permitivitas relatif yang tergolong rendah, yaitu sebesar 2,2 dan material yang tipis karena ketebalannya 1,57 mm. Ketebalan dan nilai permitivitas relatif yang rendah diperlukan untuk menghasilkan efisiensi radiasi yang baik [11]. Untuk mendapatkan kinerja antena yang baik dan sesuai dengan kebutuhan sistem yang menggunakan antena tersebut, perlu ditetapkan spesifikasi antenanya. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi antena yang dirancang. Frekuensi 15 GHz digunakan sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Parameter koefisien refleksi harus memenuhi nilai kurang dari -9,54 dB dan VSWR kurang dari 2 untuk memenuhi kinerja antena yang baik [11],[12]. Pada antena MIMO, elemen antena pada *port* yang berdekatan dapat saling menginterferensi, maka diperlukan syarat *mutual coupling* yang rendah, yaitu di bawah -20 dB [9]. Untuk memenuhi persyaratan sistem 5G menurut [13] *bandwidth* sistem 5G diharapkan dapat melebihi standar sebelumnya, yaitu sampai 1 GHz.

Tabel 1. Spesifikasi antena

| Parameter | Nilai Spesifikasi |
|------------------------|-------------------|
| Frekuensi kerja | 15 GHz |
| Koefisien Refleksi | < -9,54 dB |
| VSWR | < 2 |
| <i>Mutual Coupling</i> | < -20 dB |
| <i>Gain</i> | > 8 dB |
| <i>Bandwidth</i> | > 1 GHz |

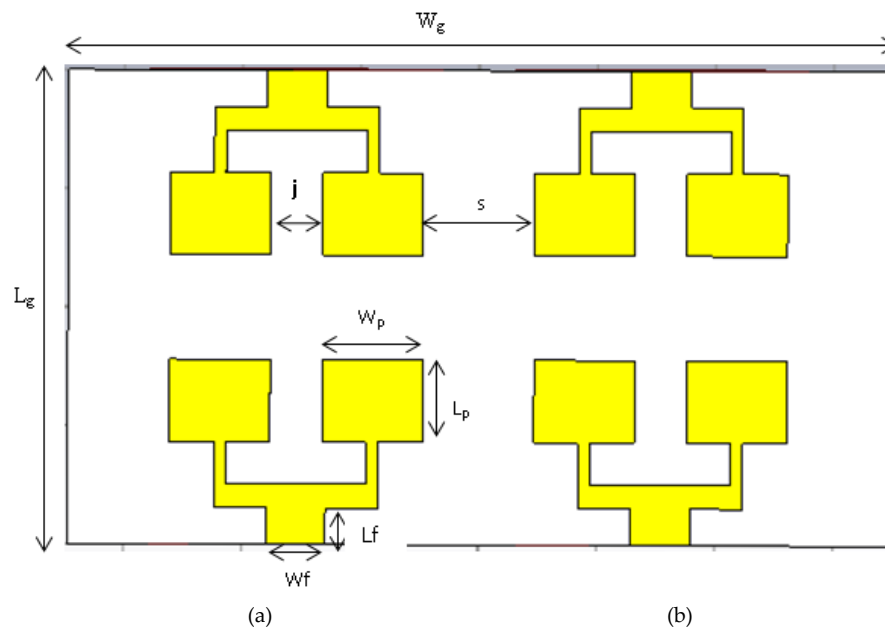
3.1. Simulasi

Antena mikrostrip dirancang untuk mendukung komunikasi MIMO empat *port* atau empat antena pada pemancar dan empat antena pada penerima. Konfigurasi antena pada setiap *port* berupa *patch* persegi panjang yang disusun dua elemen. Berdasarkan karakteristik bahan yang telah dipilih dan frekuensi operasi yang telah ditetapkan maka dimensi *patch* dan *ground plane* antena mikrostrip dapat dihitung menggunakan persamaan (1)-(7) dan mencari dimensi saluran pencatu menggunakan persamaan (8)-(14). Setelah mendapatkan dimensi antena mikrostrip maka hasil penghitungan dimasukkan ke dalam simulasi dengan menggunakan *software*.

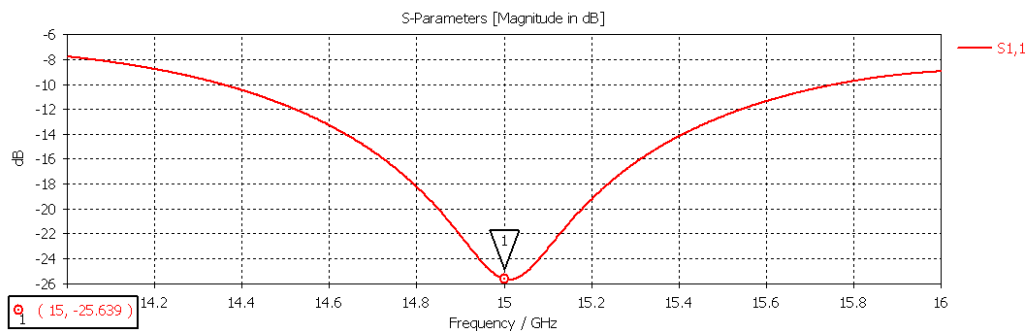
Konfigurasi dengan dimensi antenna hasil penghitungan dijalankan oleh *software* untuk mendapatkan grafik kinerja parameter antenna, yaitu koefisien refleksi yang ditunjukkan oleh grafik parameter S , VSWR, *gain*, *mutual coupling*, dan impedansi. Hasil simulasi awal belum sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan, maka perlu dilakukan optimasi antenna dengan mengubah dimensi antenna dan saluran pencatu. Perbandingan dimensi antenna mikrostrip dapat dilihat pada Tabel 2. Setelah dilakukan optimasi maka bentuk antenna yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 2. Dimensi antenna hasil penghitungan matematis dan optimasi

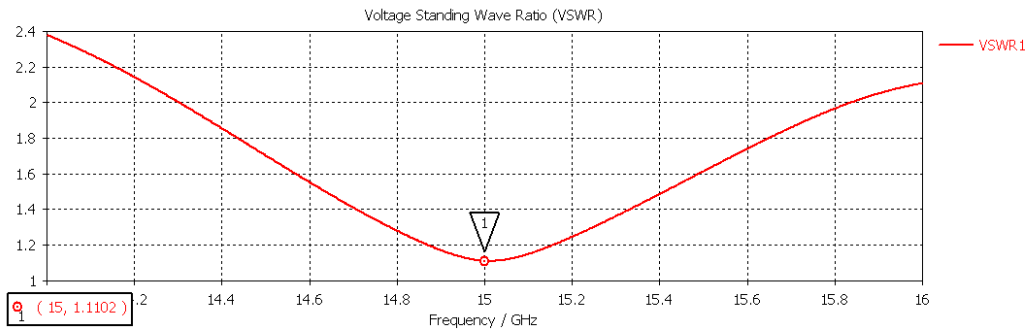
| Notasi | Nilai | | Keterangan |
|--------|-------------|----------|--|
| | Perhitungan | Optimasi | |
| L_p | 5,54 | 6,94 | Panjang <i>patch</i> |
| W_p | 7,9 | 8,5 | Lebar <i>patch</i> |
| L_g | 39,98 | 39,98 | Panjang <i>ground plane</i> |
| W_g | 69,4 | 69,4 | Lebar <i>ground plane</i> |
| L_f | 3,38 | 3,08 | Panjang saluran pencatu |
| W_f | 4,9 | 5 | Lebar saluran pencatu <i>ground plane</i> |
| J | 5 | 4,4 | Jarak antar elemen <i>patch array</i> |
| S | 10 | 9,4 | Jarak <i>patch</i> pada <i>port</i> yang berbeda |



Gambar 1. Bentuk rancangan antenna pada *software*

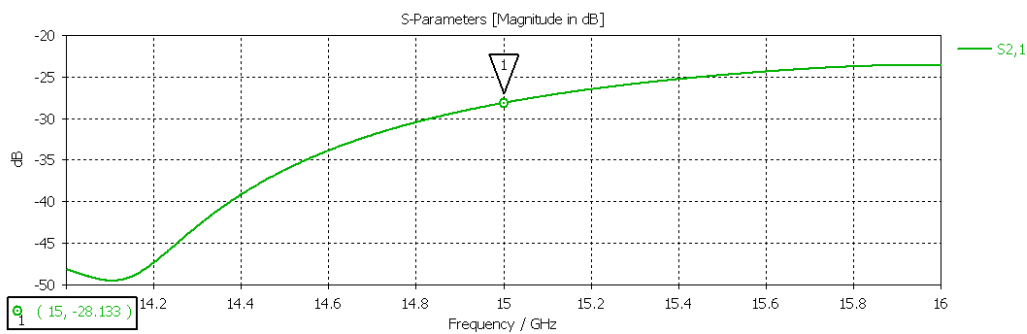


Gambar 2. Grafik parameter S (koefisien refleksi dalam dB)

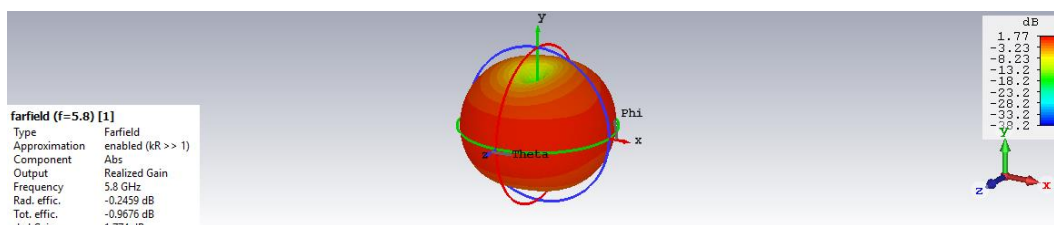


Gambar 3. Grafik VSWR

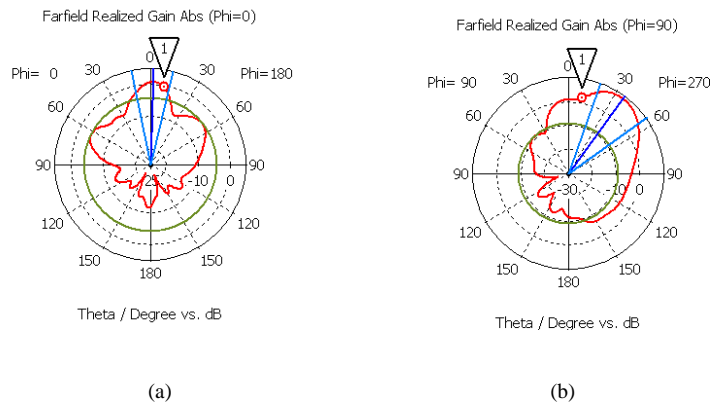
Dari hasil simulasi pada Gambar 2, didapat nilai koefisien refleksi sebesar $-25,639$ dB, sudah memenuhi spesifikasi antenna, yaitu $\leq -9,54$ dB. Dari grafik ini dapat diamati pula rentang frekuensi yang nilai koefisien refleksinya $< -9,54$ dB berada pada frekuensi $14,4 - 15,7$ GHz, sehingga *bandwidth* yang diperoleh sebesar $1,3$ GHz. Pada Gambar 3 nilai VSWR sebesar $1,11$ yang mendekati VSWR ideal, yaitu 1 . *Mutual coupling* ditunjukkan pada Gambar 4 memiliki nilai sebesar $-28,137$ dB pada frekuensi 15 GHz. Pada bagian *gain*, dapat dilihat pada Gambar 5, nilai *gain* maksimum adalah $8,59$ dB. Pada Gambar 6 didapat hasil pola radiasi *azimuth* dan elevasi dengan bentuk pola radiasi *directional*.



Gambar 4. Grafik mutual coupling



Gambar 5. Hasil simulasi gain antenna mikrostrip

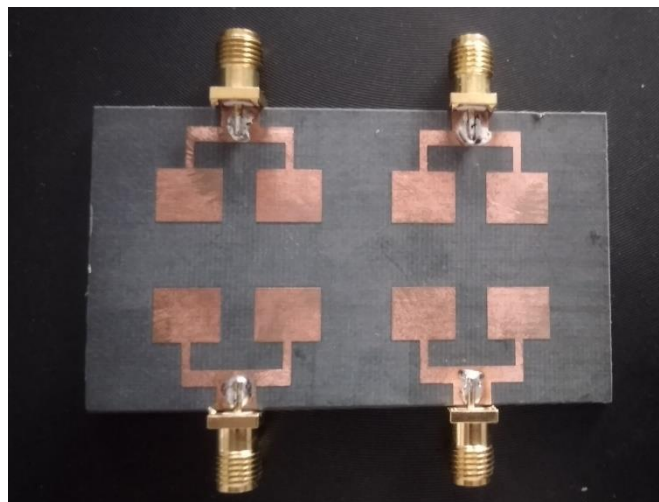


Gambar 6. Hasil pola radiasi simulasi antena (a)Azimuth dan (b)Elevasi.

4. Pengujian Antena

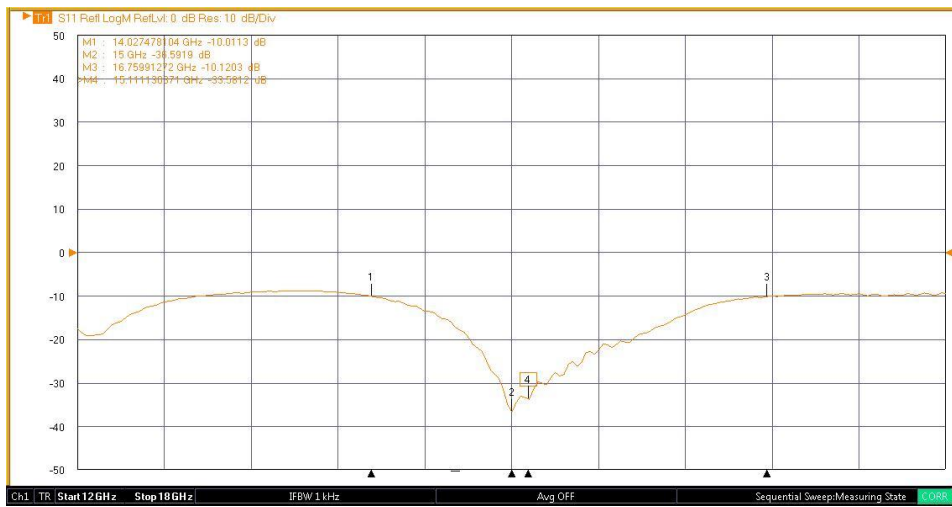
4.1. Fabrikasi Antena

Antena yang telah difabrikasi ditunjukkan pada Gambar 7. Pengukuran antena hasil fabrikasi dilakukan dengan menggunakan *Network Analyzer*.

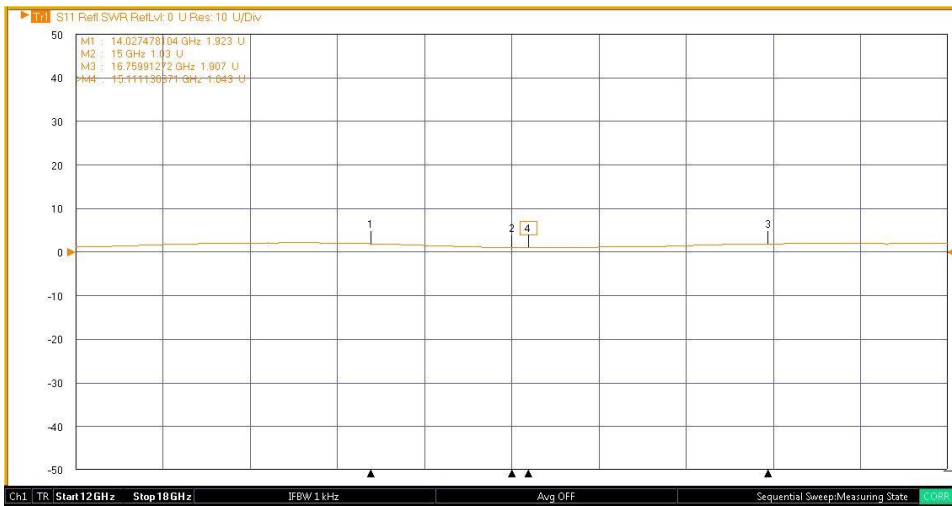


Gambar 7. Hasil fabrikasi antena.

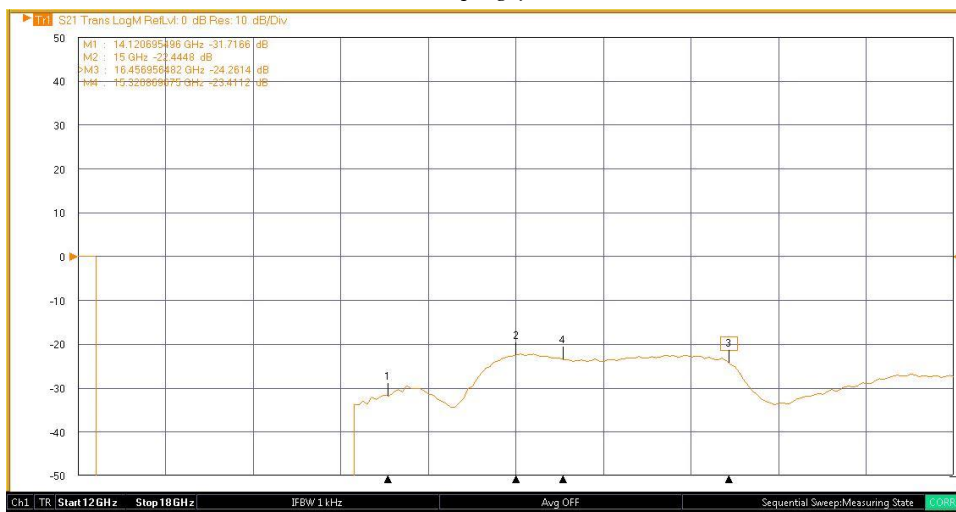
Pada Gambar 8, dapat dilihat grafik hasil pengukuran untuk koefisien refleksi antena yang ditunjukkan pada *marker M2* dengan nilai pada frekuensi resonansi 15 GHz adalah -36,5919 dB. *Bandwidth* yang dihasilkan dari pengukuran koefisien refleksi memiliki nilai sebesar 2,69 GHz dengan rentang frekuensi kerja dari 14,07 GHz sampai dengan 16,76 GHz. Pada Gambar 9 dapat dilihat hasil pengukuran VSWR di frekuensi 15 GHz yang ditunjukkan pada *marker M2* dengan nilai 1,03. Gambar 10 menunjukkan hasil pengukuran *mutual coupling* (S_{21}), pada *marker M2* di frekuensi 15 GHz, didapat *mutual coupling* sebesar -22,445 dB. *Mutual coupling* dari pengujian setiap elemen antena telah mencapai nilai yang rendah, yaitu di bawah -20 dB, yang artinya dapat menurunkan tingkat interferensi antar elemen antena yang berdekatan.



Gambar 8. Grafik pengujian koefisien refleksi antenna

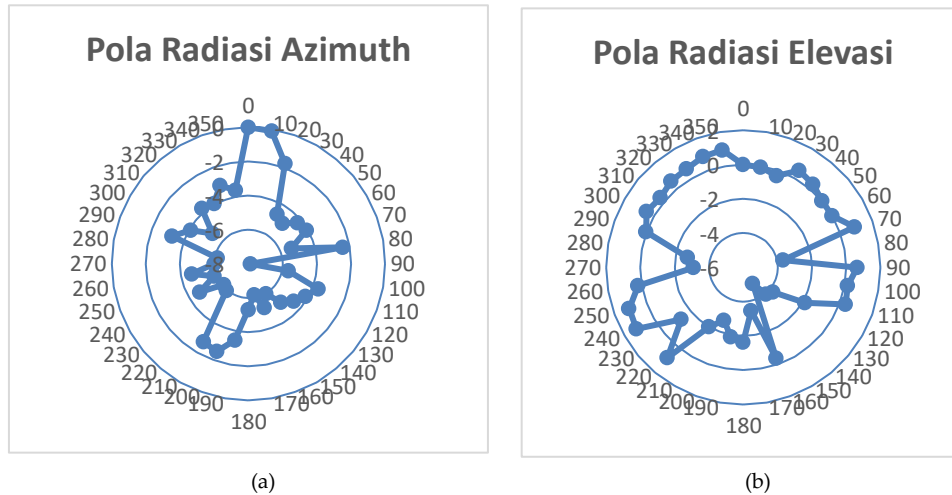


Gambar 9. Grafik hasil pengujian nilai VSWR antenna



Gambar 10. Grafik hasil pengujian *mutual coupling*

Pengujian pola radiasi ditunjukkan pada Gambar 11, terlihat bahwa antena mikrostrip persegi panjang MIMO 4x4 array dua elemen memiliki pola radiasi dengan jenis direksional, karena antena bekerja efektif pada sudut dan arah tertentu.



Gambar 16. Pola radiasi hasil pengujian antena (a) Azimuths, (b) Elevasi.

Pengukuran *gain* menggunakan *Function Generator* dan *Spectrum Analyzer* dengan prosedur yang sama dengan yang dijelaskan pada [10]. Jenis antena referensi yang digunakan adalah antena *horn* dengan *gain* sebesar 13,1 dB. Dengan daya pancar dari *function generator* sebesar 10 dBm, diperoleh hasil ukur daya antena uji dan referensi adalah sebagai berikut:

$$P_{r2}(\text{daya yang diterima antena uji}) = -38,59 \text{ dBm}; \text{ dan}$$

$$P_{r1}(\text{daya yang diterima antena referensi}) = -38,67 \text{ dBm}.$$

menggunakan Persamaan (10) pada acuan [10], diperoleh

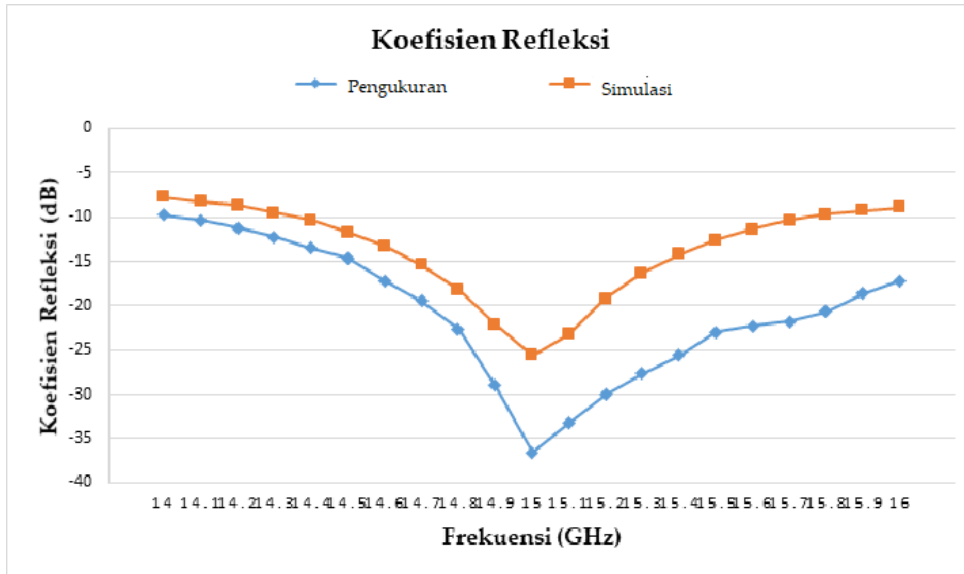
$$G_2 = P_{r2} - P_{r1} + G_1 = -38,59 - (-38,67) + 13,1 = 13,18 \text{ dB}$$

Pengukuran antena mikrostrip menghasilkan *gain* dengan nilai 13,18 dB sehingga sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan, yaitu $\geq 9 \text{ dB}$

Hasil simulasi dan pengujian antena dapat diringkas pada Tabel 3. Dengan memperhatikan Tabel 3 tersebut, dapat diketahui bahwa hasil pengukuran tidak berbeda jauh dengan simulasi rancangan antena, serta telah memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Selain itu, grafik perbandingan hasil simulasi dan pengukuran untuk parameter koefisien refleksi ditunjukkan pada Gambar 17 dan VSWR pada Gambar 18. Dari Gambar 17 dapat dilihat nilai koefisien refleksi pada simulasi dan pengukuran membentuk kurva yang hampir sama, dengan perbedaan pada hasil pengukuran memiliki nilai lebih rendah. Gambar 18 menunjukkan kurva VSWR hasil simulasi lebih curam daripada kurva hasil pengukuran. Oleh karenanya ketika mengukur rentang *bandwidth*, diperoleh *bandwidth* pengukuran menjadi lebih besar dibandingkan simulasi.

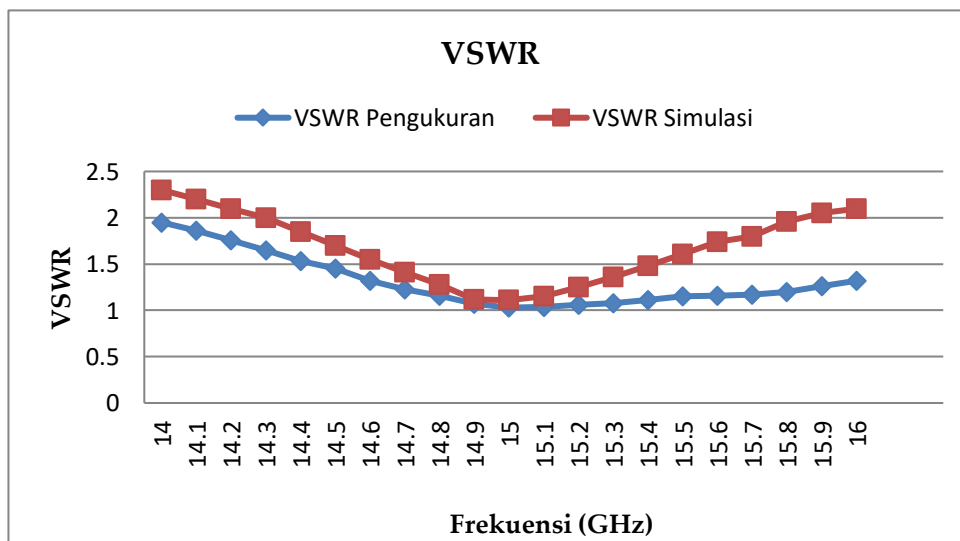
Tabel 3. Perbandingan nilai parameter hasil simulasi dengan hasil pengujian antenna

| Parameter | Nilai | | Spesifikasi |
|-------------------------|----------------|-----------------|-------------|
| | Hasil Simulasi | Hasil Pengujian | |
| Koefisien refleksi (dB) | -25,639 | -36,592 | < -9,54 dB |
| VSWR | 1,11 | 1,03 | ≤ 2 |
| Bandwidth (GHz) | 1,3 | 2,69 | > 130 MHz |
| Gain (dB) | 8,59 | 13,18 | > 9 |
| Mutual Coupling (dB) | -30,955 | -28,137 | <-20 |



Gambar 17. Grafik perbandingan koefisien refleksi simulasi dengan hasil pengujian antenna

Jika hasil ini dibandingkan dengan perancangan antenna dengan bentuk *patch* lingkaran pada makalah [10] maka hasil simulasi maupun pengujian untuk *bandwidth* pada perancangan ini lebih baik, sementara untuk nilai *gain*, perancangan [10] menghasilkan nilai *gain* yang lebih tinggi.



Gambar 18. Grafik perbandingan VSWR simulasi dengan hasil pengujian antenna

5. Kesimpulan

Perancangan, simulasi, dan realisasi antena mikrostrip dengan bentuk *patch* persegi panjang *array* dua elemen dan disusun MIMO 4×4 pada frekuensi 15 GHz telah dapat dilakukan dan diimplementasikan. Hasil simulasi menunjukkan antena memiliki koefisien refleksi sebesar -25,639 dB, VSWR bernilai 1,11, *mutual coupling* sebesar -30,955 dB, nilai *gain* 8,59 dB dan *bandwidth* sebesar 1,3 GHz. Pada antena yang telah difabrikasi diperoleh hasil pengujian nilai koefisien refleksi sebesar -36,5919 dB, VSWR sebesar 1,03, *mutual coupling* bernilai -28,137 dB, dan *gain* 13,18 dB. Untuk *bandwidth* antena mikrostrip simulasi sebesar 1,3 GHz dengan rentang 14,4 GHz – 15,7 GHz, sedangkan hasil pengukuran memiliki nilai 2,69 GHz dengan rentang 14,07 GHz – 16,76 GHz. Pola radiasi antena mikrostrip pengukuran maupun simulasi memiliki sifat yang sama, yaitu *directional*.

Daftar Pustaka

- [1] F. Qamar, T. Abbas, M. N. Hindia, K. B. Dimiyati, K. A. Bin Noordin and I. Ahmed, "Characterization of MIMO propagation channel at 15 GHz for the 5G spectrum," *2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, h. 265-270, 2017.
- [2] A. Osseiran et al., "Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of The METIS Project", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 5, h. 26–35, 2014.
- [3] J. G. Andrews et al., "What will 5G be?", *IEEE Journal Selection Areas Communications*, Vol. 32, No. 6, h. 1065–1082, 2014.
- [4] Z. Xu, Q. Zhang, L. Guo, "A Compact 5G Decoupling MIMO Antenna Based on Split-Ring Resonators", *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2019.
- [5] I. Anisah, H. Briantoro, A. Zainudin, D. Intan Permatasari, "Implementasi Sistem Komunikasi Nirkabel OFDM Berbasis *Software Defined Radio (SDR)*", *JNTETI* Vol. 7, No. 2, h. 183–189, Mei 2018.
- [6] E. Y. D. Utami, M. A. Gupita, F. D. Setiaji, "Perancangan Antena Mikrostrip MIMO 2×2 Patch Persegi Panjang pada Frekuensi LTE 2,3 GHz", *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronika (JIRE)*, Vol 4, No 1, h. 12-20, April 2021.
- [7] I. M. P. Budi, E. S. Nugraha, A. Agung, "Perancangan dan Analisis Antena Mikrostrip MIMO Circular pada Frekuensi 2.35 GHz untuk Aplikasi LTE", *Jurnal INFOTEL*, Vol. 9, No. 1, h. 136-146, Feb. 2017.
- [8] S. Maharani, A. Atmaja, I. S. Kumala, "Rancang Bangun Antena Mikrostrip MIMO 2x2 Circular Patch pada Frekuensi Kerja 2.4 GHz", *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, Vol. 3, No. 2, h. 75–88, 2019.
- [9] F. W. Ardianto, N. Mufti A., B. Syihabuddin, "Analisis Simulasi Antena MIMO 4x4 Susunan Persegi dan Sirkular pada Frekuensi 15 GHz," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, Vol. 7, No. 2, h. 174–182, Mei 2018.
- [10] E. Y. D. Utami, J. C. Novaldy, A. A. Febrianto, "Antena Mikrostrip Lingkaran untuk Komunikasi MIMO 4x4 pada Frekuensi 15 GHz" *InComTech: Jurnal Telekomunikasi dan Komputer*, Vol. 11, No. 3, , h. 221-232, Desember 2021.
- [11] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design, 3rd ed.*, USA: John Willey and Son, 2012.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd ed.*, New Jersey: John Willey and Son, 2005.
- [13] 3GPP Global Initiative, "3GPP system standards heading into the 5G era." https://www.3gpp.org/news-events/1614-sa_5g.

