



Desain antenna MIMO 2×2 patch rectangular dengan *u-slot* pada frekuensi 3,5 GHz

Hanny Madiawati^{1*}, Aulya Rachma Maulida², Vitrasia³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jalan Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kecamatan Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Indonesia

^{1*}hannymadiawati@polban.ac.id, ²aulya.rachma.tkom18@polban.ac.id, ³vitrasia@polban.ac.id

ABSTRAK

Semakin besarnya kebutuhan pengguna dalam sistem telekomunikasi di era sekarang membuat kebutuhan transmisi data pun harus semakin cepat dengan *bandwidth* yang lebar. Salah satu teknik yang dapat digunakan untuk menghadapi kebutuhan tersebut adalah teknik *multiple input multiple output* (MIMO) yang menerapkan sistem antenna jamak di sisi pemancar dan penerima sehingga dapat meningkatkan kapasitas kanal agar dapat mentransmisikan data atau informasi dari beberapa antenna secara bersamaan. Sistem MIMO juga memiliki keunggulan lain yaitu dapat mengatasi *multipath fading*. Antena ini dapat diaplikasikan pada WLAN 802.11n, sistem OFDM, serta jaringan seluler. Pada penelitian ini telah dilakukan desain antenna MIMO 2×2 patch rectangular dengan *u-slot* yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz menggunakan jenis substrat Duroid5880 yang memiliki nilai permitivitas relatif 2,2. Berdasarkan simulasi, antenna MIMO 2×2 dengan *u-slot* menghasilkan nilai koefisien isolasi sebesar -21,84 dB dan memiliki *bandwidth* sebesar 193,5 MHz dengan *gain* 5,324 dBi.

Kata kunci: antenna MIMO, *multipath fading*, *u-slot*, *bandwidth*, 5G

ABSTRACT

*The greater the needs of users in telecommunications systems in the current era makes the need for data transmission must be faster with a wide bandwidth. One technique that can be used to meet these needs is the multiple input multiple output (MIMO) technique which applies a multiple antenna system on the transmitter and receiver sides so that it can increase the channel capacity so that it can transmit data or information from several antennas simultaneously. The MIMO system also has another advantage that it can overcome multipath fading. This antenna can be applied to 802.11n WLAN, OFDM system, and cellular network. In this study, a rectangular 2×2 patch MIMO antenna with a *u-slot* has been designed that works at a frequency of 3.5 GHz using a Duroid5880 substrate type which has a relative permittivity value of 2.2. Based on the simulation, 2×2 MIMO antenna with *u-slot* produces an isolation coefficient value of -21.84 dB and has a bandwidth of 193.5 MHz with a gain of 5.324 dBi.*

Keywords: MIMO antenna, *multipath fading*, *u-Slot*, *bandwidth*, 5G

1. PENDAHULUAN

Pemenuhan kebutuhan pengguna dalam sistem komunikasi untuk menunjang kegiatan sehari-hari semakin meningkat. Hal ini membuat perkembangan teknologi bidang telekomunikasi pun berkembang semakin pesat. Beberapa pengguna layanan telekomunikasi memiliki lebih dari satu perangkat yang terhubung ke jaringan, sehingga diperlukan adanya teknologi untuk dapat meningkatkan kecepatan transmisi data dalam proses komunikasi dari pengguna ke jaringan pusat. Hadirnya teknologi 5G yang bertujuan untuk menyempurnakan generasi-generasi pendahulunya diharapkan dapat mengatasi permasalahan tersebut. *The World Radiocommunication Conference* (WRC) tidak menyatakan spesifik frekuensi yang akan digunakan, namun untuk peluncuran 5G di Eropa dan Asia akan menggunakan frekuensi 3,5 GHz [1]. Enam negara yang mempertimbangkan penggunaan frekuensi 3,5 GHz untuk percobaan spektrum 5G adalah Finlandia, Jerman, Irlandia, Itali, Jepang, dan Amerika Serikat [2]. Dalam Peraturan Menteri Kominfo No. 13 Tahun 2018 mengenai Tabel Alokasi Spektrum Frekuensi Radio Indonesia, frekuensi 3,3-4,3 GHz di beberapa negara Asia dialokasikan untuk telekomunikasi bergerak [3] dan dialokasikan juga untuk pembangunan jaringan

5G [4]. Menurut Menkominfo, dalam pengembangan teknologi 5G di Indonesia terdapat tiga pita frekuensi yaitu 700 MHz, 2,6 GHz, dan 3,5 GHz yang sesuai untuk layanan 5G *mobile broadband* [5].

Dalam jurnal *The IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*, didefinisikan bahwa antenna adalah perangkat sistem telekomunikasi yang dapat memancarkan dan menerima gelombang radio [6]. Antena yang merupakan salah satu perangkat penting untuk menunjang kinerja jaringan 5G ini adalah antena yang memiliki spektrum frekuensi yang luas. Penggunaan antena *multiple input multiple output* (MIMO) memiliki peranan penting untuk teknologi 5G. Hal ini disebabkan karena antena MIMO menggunakan lebih dari satu antena di sisi pengirim maupun penerima. Hal ini dapat dijadikan solusi dalam meningkatkan kemampuan transmisi data agar lebih cepat dan besar, serta dapat mengatasi *multipath fading* [7]. Penelitian antena MIMO 2×2 sebelumnya telah dilakukan dimana dengan bahan substrat FR-4 Epoxy yang mampu menghasilkan gain 3,35 dBi dengan *bandwidth* 164 MHz [8]. Metode penambahan *u-slot* dan *u-slot* ganda pada antena MIMO dapat memperlebar *bandwidth* [9], [10]. Dalam perancangan antena mikrostrip *dual band* yaitu pada frekuensi 2,45-2,57 GHz dan 5,1-5,4 GHz yang bertujuan untuk diaplikasikan dalam WiMAX atau WLAN, *u-slot* pada *patch* antena dimodifikasi untuk meningkatkan *gain* [11]. Metode *defected ground structure* (DGS) bentuk huruf G pada antena mikrostrip dengan *u-slot* dapat meningkatkan *bandwidth* sebesar 250 MHz, namun dengan metode DGS ini menyebabkan penurunan *gain* sebesar 1,265 dBi [12]. Nilai permitivitas pada substrat harus diperhatikan karena cukup berpengaruh pada *gain*, VSWR, dan *bandwidth* yang dihasilkan oleh antena. Semakin kecil nilai permitivitas, maka *gain* dan VSWR yang dihasilkan semakin besar, sedangkan *bandwidth* cukup sempit [13].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang antena MIMO 2×2 *patch rectangular* dengan *u-slot*. Lebih khusus lagi, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan *u-slot* terhadap parameter *bandwidth* antena. Bahan substrat yang digunakan yaitu RT Duroid 5880 yang memiliki nilai permitivitas relatif (ϵ_r) 2,2, ketebalan 3,175 mm, dan *loss tangent* 0,0009. Dengan nilai permitivitas yang kecil, akan menghasilkan *gain* yang besar. Nilai *loss tangent* yang cukup kecil pun akan menghasilkan redaman yang cukup kecil pula sehingga antena yang dihasilkan memiliki efisiensi yang baik.

2. METODE PENELITIAN

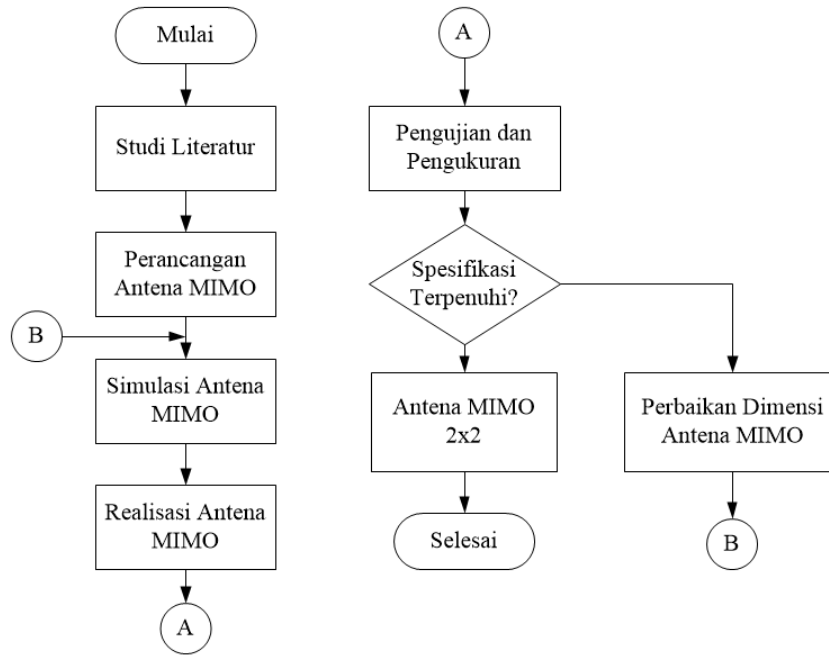
Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Dalam penelitian ini tahapan pertama yang dilakukan yaitu studi literatur untuk mendapatkan wawasan mengenai antena yang akan dirancang, lalu menentukan bahan substrat dan jenis *slot* yang akan digunakan untuk mencapai *bandwidth* dan *gain* yang lebih besar. Selanjutnya melakukan perhitungan dimensi-dimensi antena yang akan dirancang dan disimulasikan pada *software* CST Studio Suite 2019. Jika hasil simulasi belum mencapai spesifikasi, akan dilakukan optimasi desain antena sampai memenuhi spesifikasi.

2.1 Spesifikasi Perancangan Antena

Tabel 1. Spesifikasi yang hendak dicapai

No.	Spesifikasi	Keterangan
1	Frekuensi	3,25 – 3,75 GHz
2	<i>Bandwidth</i>	≥ 164 MHz
3	<i>Gain</i>	$> 3,5$ dBi

Tabel 1 memperlihatkan spesifikasi yang hendak dicapai dari simulasi antena MIMO 2×2 dengan penambahan *u-slot*. Bahan substrat yang digunakan adalah RT Duroid 5880 dengan ketebalan 3,175 mm, sedangkan untuk *patch* dan *groundplane* menggunakan tembaga dengan ketebalan 0,035 mm.



Gambar 1. Diagram alir desain antenna MIMO 2x2

2.2 Perhitungan Dimensi

Antena mikrostrip terdiri dari *ground*, substrat, dan *patch*. Perhitungan dimensi antenna tersebut menggunakan beberapa persamaan berikut:

Lebar *patch* (W) antenna dapat dihitung menggunakan persamaan (1) sebagai berikut [14]:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

Untuk menghitung panjang *patch* antenna, harus menghitung pertambahan panjang yang diakibatkan adanya *fringing effect* terlebih dahulu. Besarnya pertambahan panjang akibat *fringing effect* (ΔL) dapat dihitung menggunakan persamaan (2) berikut:

$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{w}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{w}{h} + 0,8 \right)} \right] \quad (2)$$

dengan

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

Setelah mengetahui pertambahan panjang akibat *fringing effect*, langkah selanjutnya yaitu menghitung panjang *patch* menggunakan persamaan (4) berikut:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4)$$

dengan

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (5)$$

Keterangan : ϵ_r = konstanta dielektrik
 f_r = frekuensi resonansi (Hz)
 c = kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)

Substrat dan *groundplane* memiliki ukuran sama. Untuk menghitung lebar substrat maupun *groundplane*, dapat dihitung menggunakan persamaan (6) berikut:

$$L_g = 3h + L + L_f \quad (6)$$

Panjang substrat dan *groundplane* dapat dihitung dengan persamaan (7):

$$W_g = 6h + W \quad (7)$$

Dimensi *slot* yang akan ditambahkan pada *patch* antena dihitung menggunakan persamaan (8) [9]:
 Lebar *slot* dapat dihitung menggunakan rumus:

$$F = \frac{\lambda}{60} \quad (8)$$

Untuk menghitung komponen vertikal *slot* dapat menggunakan persamaan (9) berikut:

$$\frac{C}{W} \geq 0,3 \quad (9)$$

Untuk menghitung komponen horizontal *slot* dapat menggunakan persamaan (10) berikut:

$$D = \frac{c}{f_{low} \times \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2(L + 2\Delta L - F) \quad (10)$$

Teknik pencatuan yang digunakan yaitu *inset feed*, yang mana untuk perhitungan dimensi pencatuan *inset feed* ini dapat dihitung menggunakan Persamaan (11) sampai Persamaan (17).

Untuk menghitung lebar *stripline*, dapat dihitung dengan persamaan:

$$W_f = \frac{2h}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} (\ln(B-1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r}) \right] \quad (11)$$

dengan $B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$

Panjang saluran pencatu dapat dihitung menggunakan Persamaan (12):

$$L_f = \frac{1}{4} \lambda_g \quad (12)$$

dengan

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (13)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (14)$$

Panjang *inset feed* dihitung dari persamaan resistansi masukan 50 ohm.

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1)} \left[\cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \right] \quad (15)$$

Dengan lebar *inset feed*:

$$G_{pf} = \frac{W_f}{2} \quad (16)$$

Jarak antar elemen antenna:

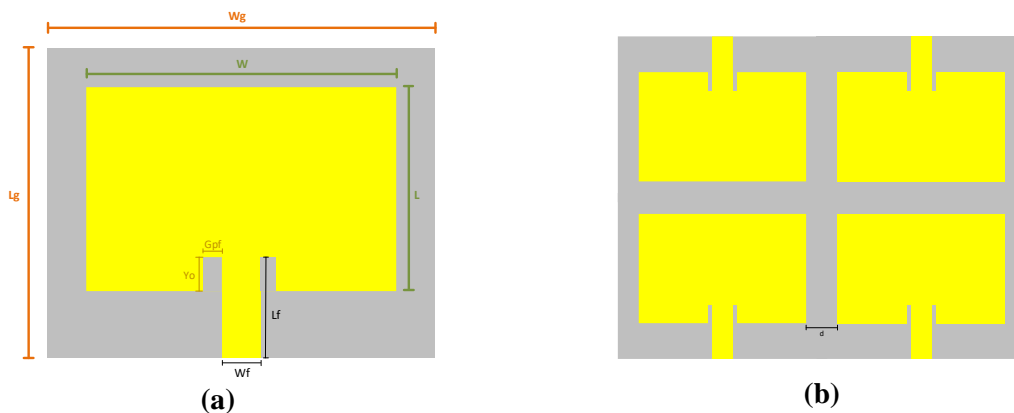
$$d = \frac{\lambda_g}{4} \quad (17)$$

Hasil perhitungan dimensi antenna secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 2.

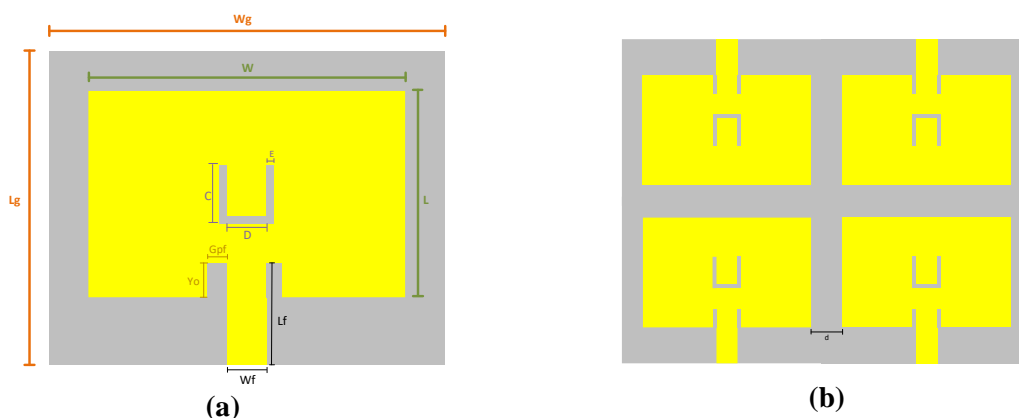
Tabel 2. Ukuran dimensi antenna 1 elemen

Parameter	Nilai (mm)	Keterangan
W	33,881	Lebar patch
L	26,941	Panjang patch
W _f	8,3932	Lebar saluran pencatu
L _f	14,975	Panjang transformator
y ₀	10,883	Panjang inset feed
G _{pf}	4,1966	Lebar gap inset feed
W _g	52,931	Lebar subtrat dan ground
L _g	51,446	Panjang subtrat dan ground
H _s	3,175	Tinggi subtrat
H _t	0,035	Tinggi patch
d	21,24	Jarak antar patch

Dalam penelitian ini dibuat dua rancangan antenna yaitu antenna MIMO 2×2 tanpa *u-slot* dan antenna MIMO 2×2 dengan *u-slot* yang bertujuan untuk membandingkan hasil parameter yang diperoleh dari kedua antenna ini. Tahapan awal adalah merancang antenna mikrostrip satu elemen berdasarkan hasil perhitungan pada Persamaan (1) sampai Persamaan (17) di atas. Untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan spesifikasi, perlu adanya optimasi. Dari antenna satu elemen yang sudah dioptimasi, kemudian akan digandakan menjadi empat elemen. Rancangan antenna yang akan dibuat ditunjukkan oleh Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Desain antenna: (a) mikrostrip 1 elemen, (b) MIMO 2×2 tanpa *u-slot*



Gambar 3. Desain antenna: (a) mikrostrip 1 elemen, (b) MIMO 2×2 dengan *u-slot*

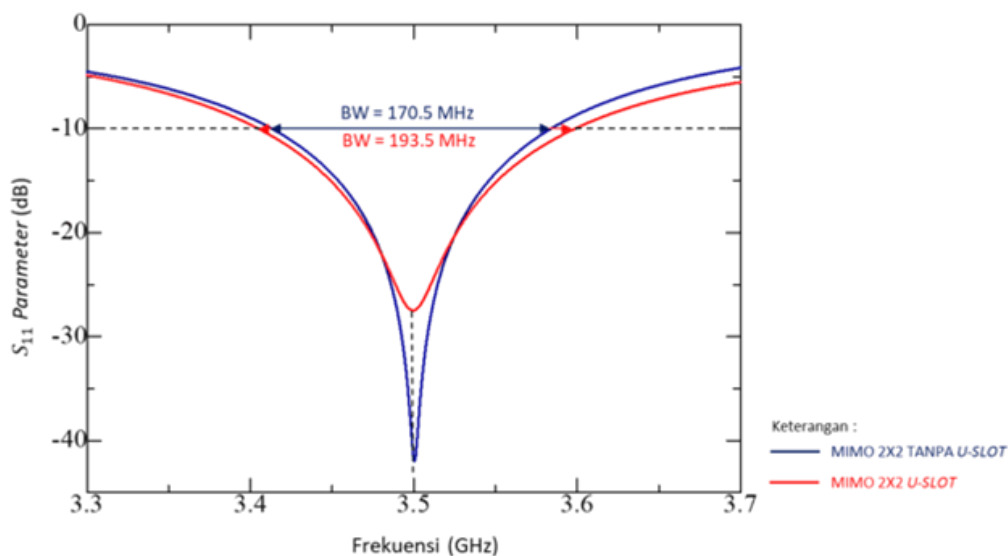
Gambar 2(b) dan Gambar 3(b) merupakan hasil akhir desain antenna yang disimulasikan pada *software* CST Studio Suite 2019. Ukuran dimensi pada antenna ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ukuran dimensi antenna

Parameter	Antena MIMO 2x2 tanpa <i>u-slot</i>	Antena MIMO 2x2 dengan <i>u-slot</i>	Keterangan
W	38,56	45,45	Lebar <i>patch</i>
L	27,158	27,09	Panjang <i>patch</i>
W _g	43,25	53,21	Lebar substrat dan <i>ground</i>
L _g	42,36	48,36	Panjang substrat dan <i>ground</i>
W _f	4,51	7,22	Lebar <i>feeder</i>
L _f	5	4,15	Panjang <i>feeder</i>
G _{pf}	0,85	0,55	Gap <i>inset feed</i>
y ₀	3,87	4,07	Panjang <i>inset feed</i>
T _s	3,175	3,175	Tinggi substrat
T _c	0,035	0,035	Tinggi tembaga
d	4,69	9,76	Jarak antar <i>patch</i>

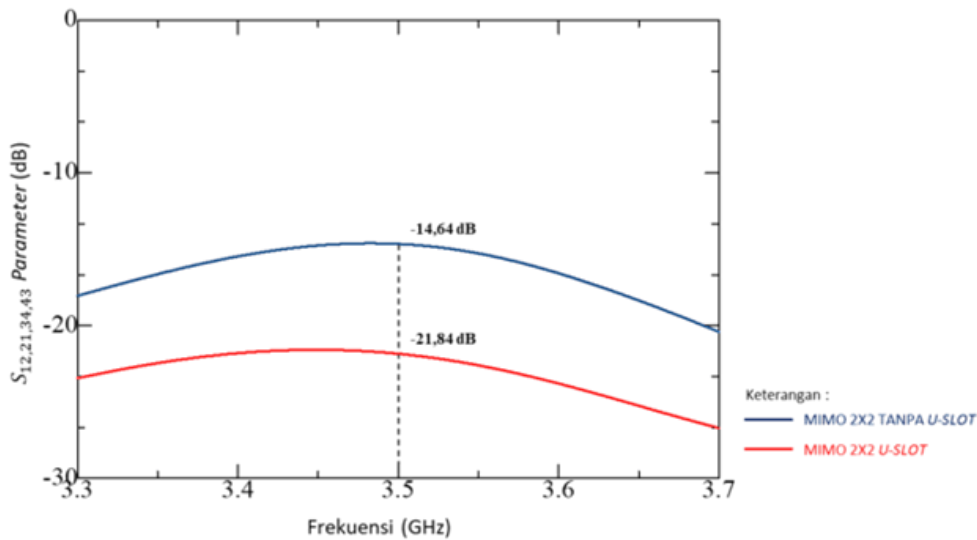
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah antenna dirancang, kemudian dilakukan pengujian untuk mengetahui spesifikasi yang dihasilkan oleh antenna tersebut. Gambar 4 menunjukkan perbedaan *bandwidth* yang dihasilkan oleh antenna MIMO 2x2 tanpa *u-slot* dan antenna MIMO 2x2 dengan *u-slot* pada frekuensi tengah 3,5 GHz. *Bandwidth* yang dihasilkan oleh antenna MIMO 2x2 tanpa *u-slot* sebesar 170,5 MHz pada *band* frekuensi 3,4133-3,5838 GHz, sedangkan antenna MIMO 2x2 dengan *u-Slot* menghasilkan *bandwidth* 193,5 MHz pada *band* frekuensi 3,405-3,5985 GHz dan keduanya sudah memenuhi spesifikasi.



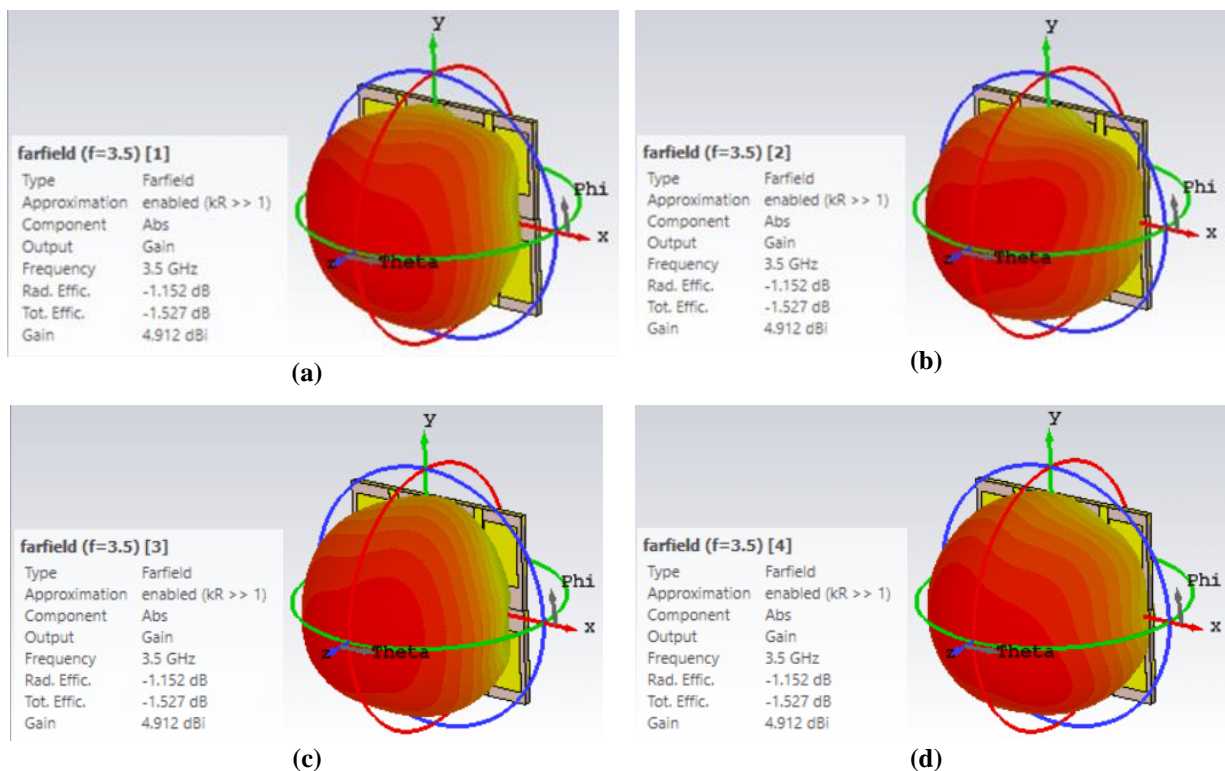
Gambar 4. Grafik S-Parameter Antena MIMO 2x2 Tanpa dan Menggunakan *U-Slot*

Gambar 5 menunjukkan koefisien isolasi antenna MIMO 2x2 tanpa dan menggunakan *u-slot* pada frekuensi 3,5 GHz. Nilai koefisien isolasi antenna MIMO 2x2 tanpa *u-slot* sebesar -14,64 dB pada frekuensi ini tidak memenuhi spesifikasi. Sedangkan nilai koefisien isolasi antenna MIMO 2x2 dengan *u-slot* sebesar -21,84 dB yang mana sudah memenuhi spesifikasi ≤ -20 dB pada masing-masing *port*, sehingga tidak terjadi interferensi antara masing-masing antenna. Jarak antar *patch* antenna MIMO 2x2 tanpa *u-slot* yaitu 4,69 mm, sedangkan jarak antar *patch* antenna MIMO 2x2 dengan *u-slot* yaitu 9,76 mm. Berdasarkan nilai koefisien isolasi yang dihasilkan, didapatkan bahwa jarak antar *patch* berpengaruh pada koefisien isolasi yang dihasilkan. Semakin semakin jauh jarak antar *patch*, maka koefisien isolasi semakin baik.



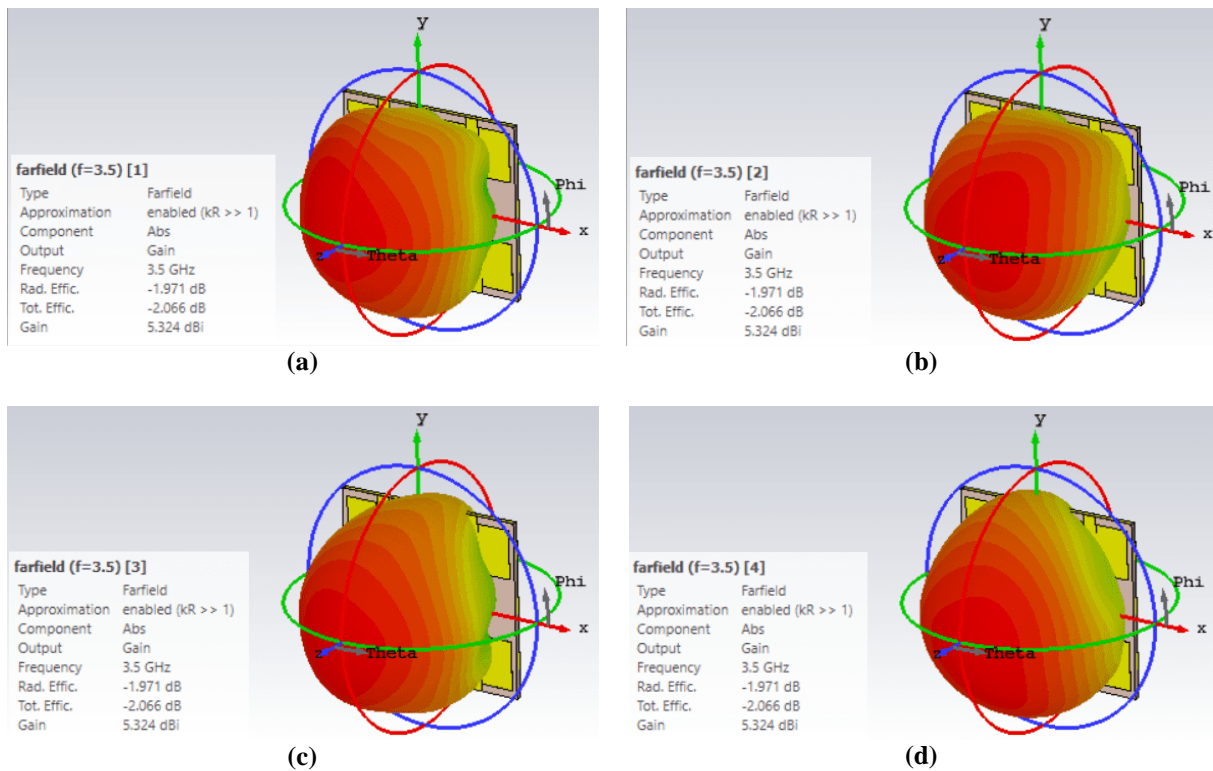
Gambar 5. Koefisien isolasi S_{12} , S_{21} , S_{34} , S_{43} antenna MIMO 2x2 tanpa dan menggunakan *u-slot*

Gain yang diperoleh oleh keempat elemen pada antenna MIMO 2x2 tanpa *u-slot* ditunjukkan pada Gambar 6 yaitu sebesar 4,912 dBi dan sudah memenuhi spesifikasi $\geq 3,5$ dBi pada frekuensi 3,5 GHz.

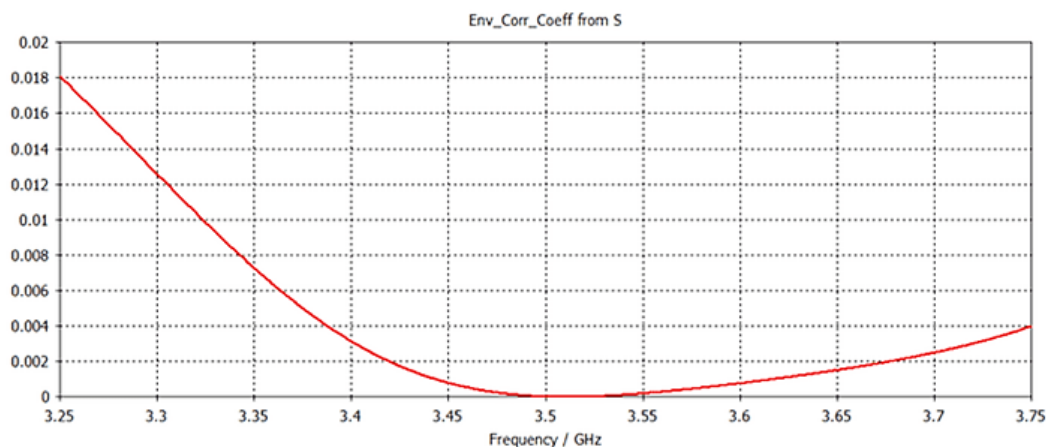


Gambar 6. *Gain*: (a) antenna 1, (b) antenna 2, (c) antenna 3, (d) antenna 4 MIMO 2x2 tanpa *u-slot*

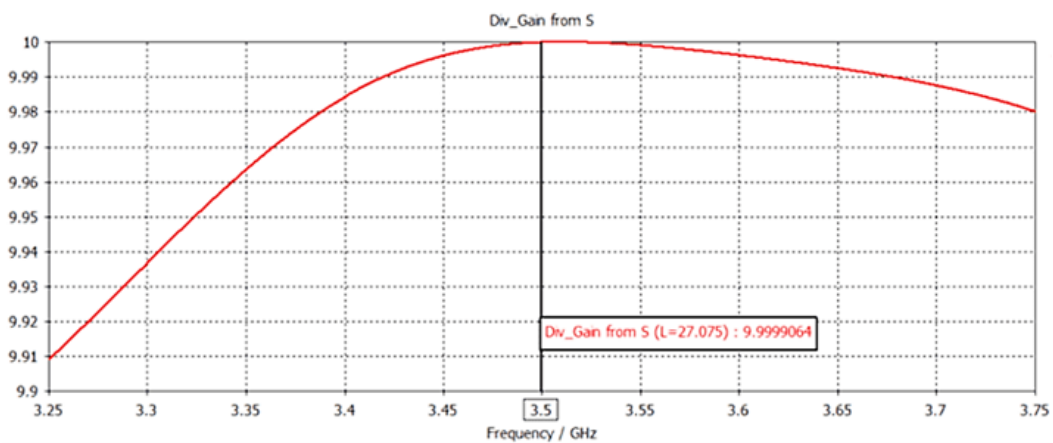
Gambar 7 menunjukkan *gain* antenna MIMO 2x2 dengan penambahan *u-slot* meningkat dari antenna MIMO 2x2 tanpa *u-slot*, *gain* yang didapatkan sebesar 5,324 dBi pada frekuensi tengah 3,5 GHz. Secara keseluruhan, dari antenna mikrostrip satu elemen tanpa *slot* menjadi antenna MIMO 2x2 dengan *u-slot* terjadi kenaikan *gain* sebesar 0,092 dBi. Pada Gambar 8 terlihat nilai *envelope correlation coefficient* (ECC) yang dihasilkan antenna MIMO 2x2 dengan *u-slot* mendekati nol dengan *diversity gain* 9,99 dB pada frekuensi 3,5 GHz yang dapat dilihat pada Gambar 9. Ini menunjukkan bahwa independensi dari masing-masing *patch* antenna sudah baik sehingga kinerja antar *patch* antenna pun tidak saling menginterferensi.



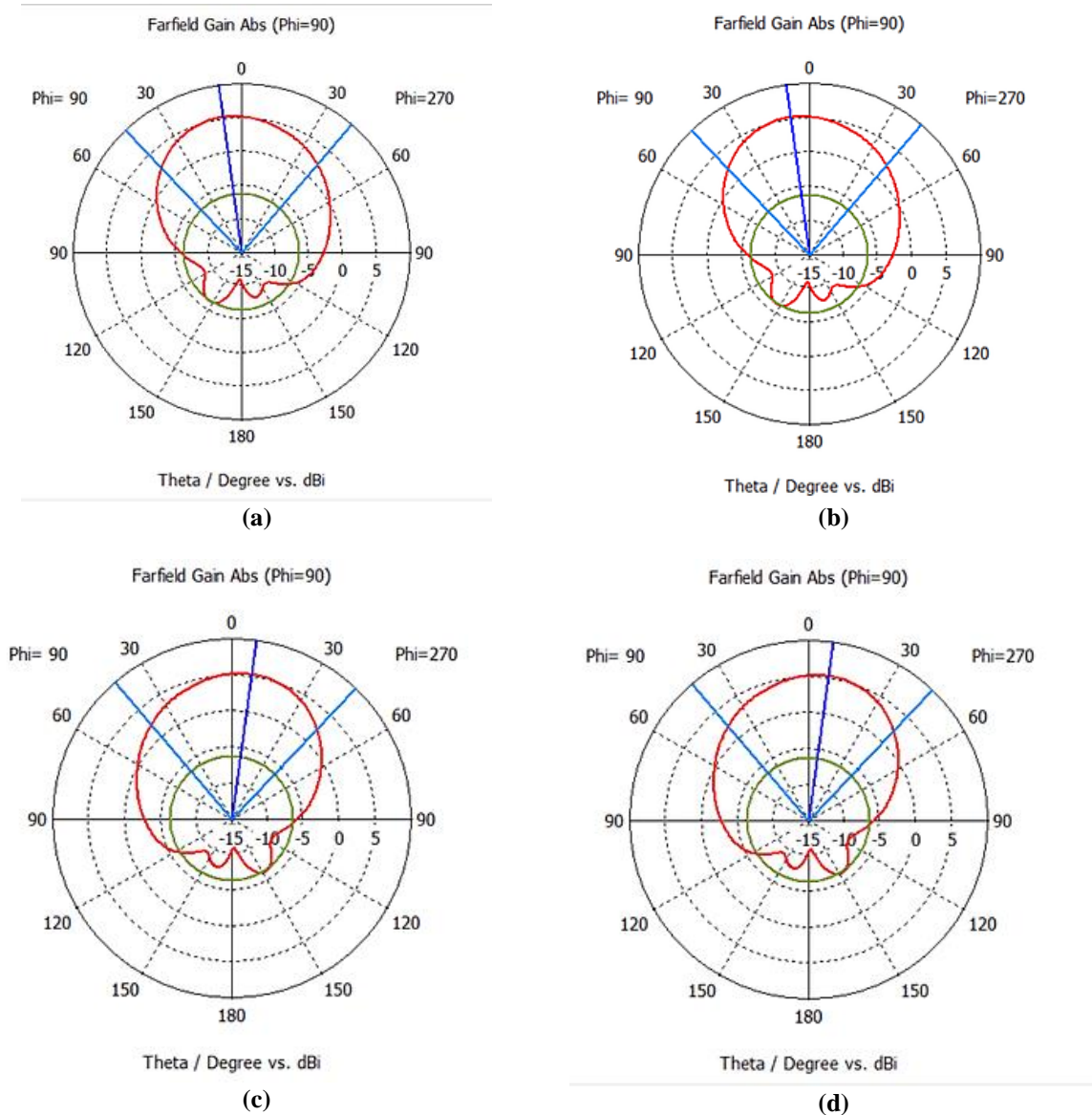
Gambar 7. Gain: (a) antenna 1, (b) antenna 2, (c) antenna 3, (d) antenna 4 MIMO 2x2 dengan u-slot



Gambar 8. Grafik envelope correlation coefficient (ECC) antenna



Gambar 9. Grafik diversity gain antenna

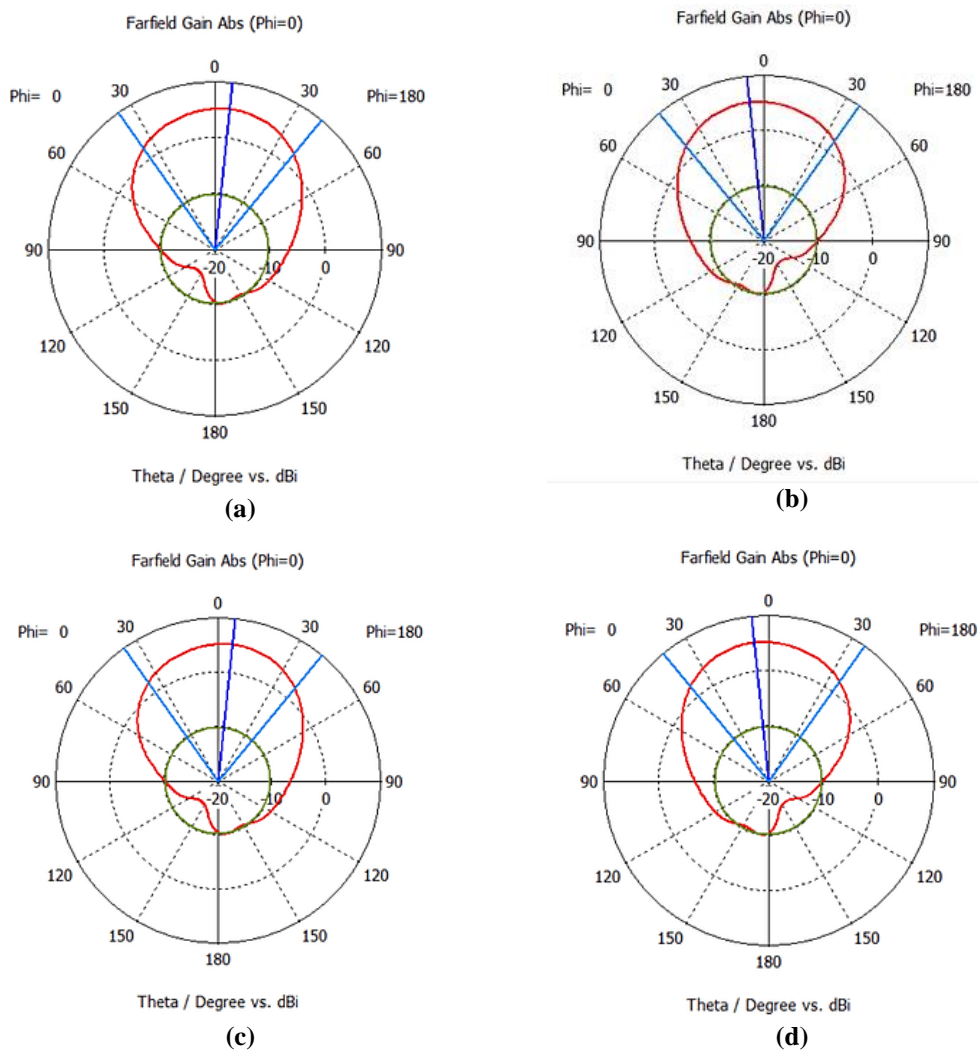


Gambar 10. Pola radiasi bidang E-Plane: (a) antenna 1, (b) antenna 2, (c) antenna 3, (d) antenna ke-4 MIMO 2x2 dengan u-slot

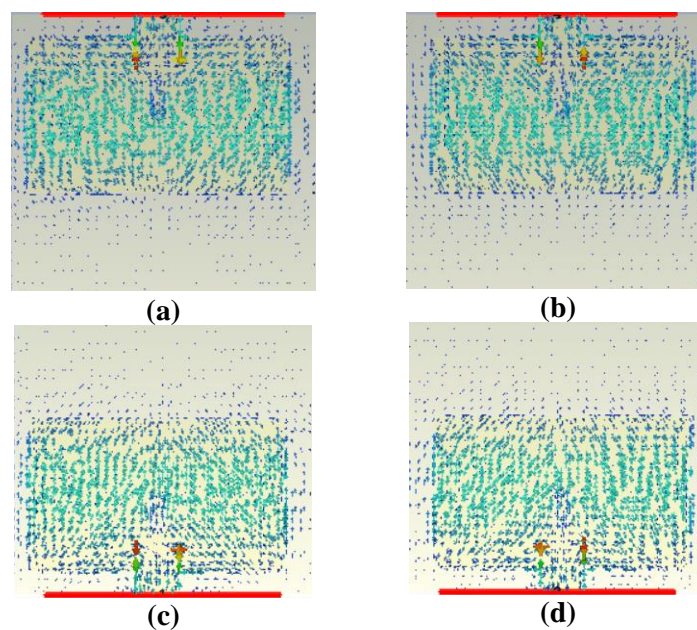
Gambar 10 menunjukkan pola radiasi dalam bidang E-Plane dan Gambar 11 menunjukkan pola radiasi dalam bidang H-Plane. Keduanya memperlihatkan bahwa pola radiasi yang dihasilkan dari simulasi antenna MIMO 2x2 dengan u-slot adalah unidirectional. Nilai HPBW yang diperoleh antenna MIMO 2x2 dengan u-slot pada bidang E-Plane sebesar 84,12° dan pada bidang H-Plane sebesar 75,02°. Distribusi arus pada Gambar 12 juga menunjukkan bahwa setiap antenna bekerja secara independen ketika masing-masing port bekerja. Adapun hasil perbandingan simulasi antenna MIMO 2x2 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan hasil simulasi antenna MIMO 2x2

Parameter Antena	Antena 1 Elemen	Antena MIMO 2x2 tanpa U-Slot	Antena MIMO 2x2 dengan U-Slot
Band Frekuensi (GHz)	3,5757 – 3,4212 GHz	3,4133-3,5838 GHz	3,405-3,5985 GHz
Bandwidth (MHz)	154,5	170,5	193,5
Gain (dBi)	5,232	4,912	5,324



Gambar 11. Pola radiasi bidang H -Plane: (a) antenna 1, (b) antenna 2, (c) antenna 3, (d) antenna ke-4 MIMO 2×2 dengan u -slot



Gambar 12. Distribusi arus: (a) antenna 3, (b) antenna 4, (c) antenna 1, (d) antenna 2 MIMO 2×2 u -slot

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil dilakukan desain antenna MIMO 2×2 dengan penambahan *u-slot* pada frekuensi 3,5 GHz untuk aplikasi 5G. Hasil simulasi antenna MIMO 2×2 tanpa *u-slot* diperoleh *bandwidth* sebesar 170,5 MHz sedangkan hasil simulasi antenna MIMO 2×2 dengan *u-slot* diperoleh *bandwidth* sebesar 193,5 MHz, sehingga diperoleh peningkatan *bandwidth* sebesar 13,49%. Nilai koefisien isolasi dari antenna MIMO 2×2 dengan *u-slot* yaitu -21,84 dB. Hal ini menunjukkan independensi antar *patch* antenna sudah cukup baik sehingga tidak saling menginterferensi. Kemudian untuk hasil simulasi antenna 1 elemen diperoleh *gain* sebesar 5,232 dBi, sedangkan hasil simulasi antenna MIMO 2×2 dengan *u-slot* diperoleh *gain* sebesar 5,324 dBi, sehingga diperoleh peningkatan *gain* sebesar 1,76%. Hasil dari simulasi pola radiasi pun sudah sesuai dengan spesifikasi dimana menunjukkan pola radiasi jenis *unidirectional*. Untuk penelitian selanjutnya, antenna MIMO 2×2 ini dapat dikembangkan menggunakan bentuk *slot* yang berbeda atau dengan metode lainnya agar memperoleh *bandwidth* yang lebih lebar dan *gain* yang lebih besar.

REFERENSI

- [1] H. U. Mustakim, "Tantangan Implementasi 5G di Indonesia," *INTEGER: Journal of Information Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 26-36, 2019.
- [2] M. Matinmikko, S. Yrjola, V. Seppanen, P. Ahokangas, H. Hammainen, and M. Latva-aho, "Analysis of Spectrum Valuation Elements for Local 5G Networks: Case Study of 3.5 GHz Band," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 741-753, 2019.
- [3] Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia Tentang Tabel Alokasi Spektrum Frekuensi Radio Indonesia, Nomor 13 Tahun 2018.
- [4] S. A. Ekawibowo, M. P. Pamungkas, and R. Hakimi, "Analysis of 5G Band Candidates for Initial Deployment in Indonesia," in *2018 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, 2018, pp. 1-6.
- [5] (2021) KOMINFO, "Jaringan 5G Perdana, Menteri Johnny: Wujud Akselerasi Transformasi Digital," Siaran Pers No. 184/HM/KOMINFO/05/2021, 24 Mei 2021. [Online]. Available: https://www.kominfo.go.id/content/detail/34679/siaran-pers-no-184hmkominfo052021-tentang-jaringan-5g-perdana-menteri-johnny-wujud-akselerasi-transformasi-digital/0/siaran_pers
- [6] IEEE Standard for Definitions of Term for Antennas, IEEE Std 145-2013.
- [7] N. Amelia, "Rancang Bangun Antena MIMO Untuk Teknologi 5G", *Disertasi Doktor*, Universitas Hasanuddin, 2020.
- [8] A. K. Muhidin, Desain dan Realisasi Antena MIMO 2×2 Patch Rectangular Untuk Komunikasi 5G Pada Frekuensi 3,5 Ghz, *Tugas Akhir*, Politeknik Negeri Bandung, 2020.
- [9] K. Jones, L. Olivia, and B. Syihabuddin, "Perancangan Antena MIMO 2×2 Array Rectangular Patch dengan U-Slot untuk Aplikasi 5G," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, vol. 6, no. 1, pp. 93-98, 2017.
- [10] E. Sandi, W. Djatmiko, and R. K. Putri, "Desain U-slot Ganda untuk Meningkatkan Bandwidth Antena MIMO 5G Millimeter-wave," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 8, no.1, pp. 150-162, 2020.
- [11] S. Panusa and K. Mithilesh, "Modified U-Slot Microstrip Patch Antenna with Gain Enhancement," in *Sixth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (IEEE computer society)*, 2014, pp. 83-86.
- [12] A. Rajawat and N. Saxena, "Design and Implementation of a Wideband U Slot Microstrip Patch Antenna Using DGS for C Band," *Springer Nature Singapore Pte Ltd*, pp. 86-95, 2019.
- [13] S. Rahayu and T. A. Wiharso, "Perancangan dan Simulasi Antena Mikrostrip Satu Elemen Pada Frekuensi WLAN 2,4 GHz," *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Teknik Elektro Telekomunikasi Indonesia*, vol. 10, No. 2, pp. 57-67, 2019.
- [14] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design Fourth Edition*, Jhon Wiley & Sons, Inc, Publisher, New Jersey, 2015.

