JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), Vol. 6, No. 2, Desember 2021, Hal. 253-262
Terakreditasi "**Peringkat 3**" oleh Kemenristek/BRIN, Nomor SK: 85/M/KPT/2020
DOI: 10.31544/jtera.v6.i2.2021.253-262
p-ISSN 2548-737X
e-ISSN 2548-8678

Perancangan Antena Mikrostrip *Array* MIMO 2x2 dengan Metode *Slit* pada Frekuensi Kerja 3,5 GHz untuk Sistem Komunikasi 5G

Dwindary Annisah, Syah Alam[#], Indra Surjati, Lydia Sari, Galang Trihantoro, Aulia Anindya Dhanyswari
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti
Jl. Kyai Tapa No.1, Kota Jakarta Barat, DKI Jakarta 11440, Indonesia
[#]syah.alam@trisakti.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan desain antena mikrostrip *array multiple input multiple output* (MIMO) 2x2 dengan metode *slit* untuk sistem komunikasi 5G yang mampu bekerja pada frekuensi 3,5 GHz. Antena dirancang dengan menggunakan jenis substrat Duroid RO5880 dengan nilai konstanta dielektrik 2,2, rugi-rugi dielektrik 0,0009, dan ketebalan 1,57 mm. Teknik *array* dan MIMO digunakan untuk meningkatkan *gain* serta keterarahan dari antena yang diusulkan. Selain itu, MIMO juga berfungsi untuk meningkatkan level penerimaan pada aplikasi *multi user.* Penambahan metode *slit* bertujuan untuk mereduksi dimensi serta meningkatkan *bandwidth* antena. Dari hasil simulasi didapatkan nilai *return loss* sebesar -38,89 dB pada frekuensi 3,5 GHz dengan *bandwidth* 241 MHz. *Gain* yang didapatkan dari hasil simulasi adalah 11,13 dB pada frekuensi 3,5 GHz. Nilai *isolation loss* yang didapatkan -74,34 dB dengan jarak antar elemen MIMO 40 mm. Penerapan metode *slit, array* dan MIMO yang diusulkan pada penelitian ini mampu meningkatkan *gain* sebesar 42,13% daripada *single* elemen. Selain itu, penelitian yang diusulkan telah berhasil mereduksi dimensi *patch* sebesar 7,44% dan *enclosure* 28,99% dibandingkan antena *array* MIMO 2x2 tanpa *slit*. Antena MIMO yang diusulkan juga memiliki nilai *Envelope Correlation Cofficient* (ECC) dan *Diversity Gain* (DG) yang telah memenuhi ambang batas yang dipersyaratkan untuk antena MIMO.

Kata kunci: antena mikrostrip, MIMO, metode *slit,* metode *array,* 5G

Abstract

This study proposes a 2x2 multiple input multiple output (MIMO) microstrip array antenna design with the slit method for a 5G communication system capable of working at a frequency of 3.5 GHz. The antenna is designed using Duroid RO5880 substrate with a dielectric constant value of 2.2, dielectric loss of 0.0009, and a thickness of 1.57 mm. Array and MIMO techniques are used to increase the gain and directivity of the proposed antenna. In addition, MIMO also serves to increase the level of acceptance in multi-user applications. The addition of the slit method aims to reduce the dimensions and increase the bandwidth of the antenna. From the simulation results, the return loss value is -38.89 dB at a frequency of 3.5 GHz with a bandwidth of 241 MHz. The gain obtained from the simulation results is 11.13 dB at a frequency of 3.5 GHz. The isolation loss value obtained is -74.34 dB with a distance between MIMO elements of 40 mm. The application of the slit, array and MIMO methods proposed in this study is able to increase the gain by 42.13% than the single element. In addition, the proposed research has succeeded in reducing patch dimensions by 7.44% and enclosure 28.99% compared to 2x2 MIMO array antennas without slit. The proposed MIMO antenna also has the Envelope Correlation Cofficient (ECC) and Diversity Gain (DG) values that meet the required threshold for MIMO antennas.

Keywords: *microstrip antenna, MIMO, slit method, array method, 5G*

I. PENDAHULUAN

Pada saat pertama kali diluncurkan tahun 2018 lalu, sistem komunikasi generasi kelima (5G) diharapkan mampu diaplikasikan secara mendunia pada tahun 2020. Namun kenyataannya sampai saat ini sistem komunikasi tersebut masih belum banyak diterapkan di Indonesia. Padahal dengan adanya

Diterima: 11 Agustus 2021; Direvisi: 15 November 2021; Disetujui: 3 Desember 2021

© 2021 JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), Politeknik Sukabumi

sistem tersebut diharapkan dapat memberikan layanan dengan *data rate* tinggi dan cakupan luas, serta menjamin terciptanya penggunaan komunikasi tanpa hambatan [1]. Solusi dan inovasi terus ditawarkan untuk menjadi teknologi utama komunikasi 5G salah satunya dengan menggunakan antena mikrostrip pada rentang frekuensi 3,5 GHz. Antena mikrostrip dipilih karena mempunyai kelebihan mulai dari dimensi yang *compact*, bentuknya yang sederhana sehingga biaya pabrikasi menjadi lebih terjangkau hingga mampu bekerja pada frekuensi yang tinggi [2]. Namun antena mikrostrip juga mempunyai kekurangan yakni *gain* dan direktivitas yang rendah. Beberapa penelitian telah diusulkan untuk meningkatkan *gain array* [3] dan *proximity coupling* [4], sedangkan untuk untuk mereduksi dimensi menggunakan metode *slit* telah dilakukan [5], [6], *slot* [7], dan fraktal [8]. Selanjutnya, untuk meningkatkan *bandwidth* pada antena mikrostrip dapat menggunakan beberapa metode yaitu parasitik [9] dan *coplanar waveguide* [10].

Agar dapat melayani lebih optimal untuk sistem komunikasi 5G dan menutupi kekurangan dari antena mikrostrip tersebut, maka antena mikrostrip perlu dirancang dengan menggunakan metode *array* yang berfungsi untuk meningkatkan *gain* dan keterarahan dari masing-masing *port* antena. Metode *multiple input multiple output* (MIMO) agar kualitas layanan dan konetivitas menjadi lebih baik dan solusi menghadapi kemungkinan terjadinya pemantulan, difraksi, dan *scattering* gelombang. Untuk mereduksi dimensi dan meningkatkan *bandwidth* dari antena mikrostrip maka ditambahkan pula teknik *slit* dalam perancangan antena [11].

Pada penelitian sebelumnya yang telah diusulkan oleh [12] telah berhasil merancang antena mikrostrip MIMO 4x4 dengan nilai *return loss* -13,55 dB dan *gain* 6,95 dBi. Selanjutnya pada penelitian yang diusulkan oleh [13] merancang antena mikrostrip *array* MIMO 2x2 pada frekuensi 15 GHz dengan nilai *return loss* -12,28 dB dan *gain* 10,8 dB. Namun kekurangan pada penelitian tersebut yakni masih menghasilkan *gain* dan keterarahan yang rendah sehingga perlu dilakukan optimasi. Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka dirancanglah antena mikrostrip *array* MIMO 2X2 dengan metode *slit* yang mampu bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dengan nilai *return loss , gain*, yang lebih baik daripada penelitian yang telah dipaparkan sebelumnya, untuk mewujudkan sistem komunikasi 5G yang dapat bekerja secara optimal.

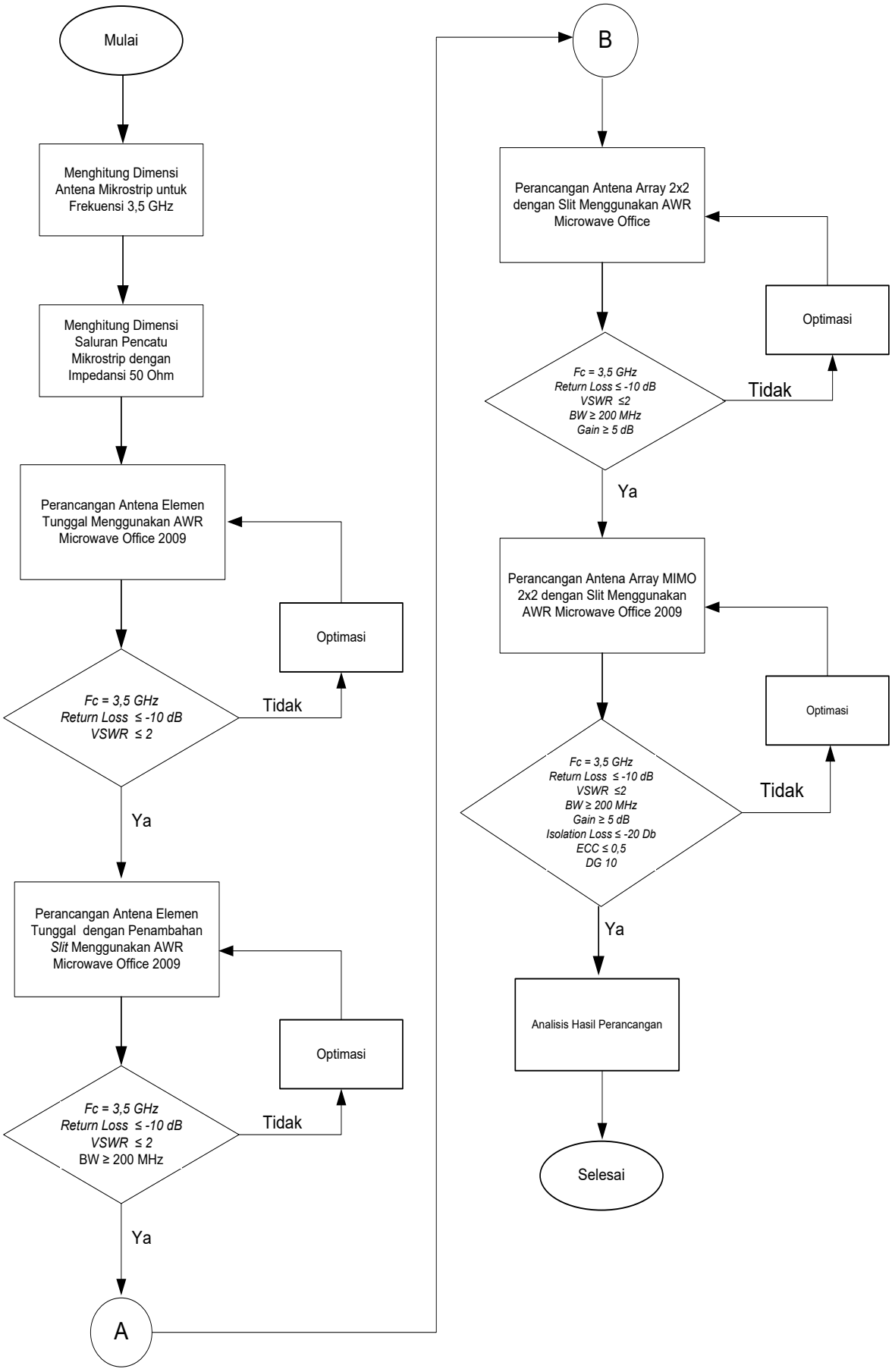
II. METODE PENELITIAN

A. Proses Perancangan Antena

Pada tahapan ini dilakukan beberapa proses mulai dari menentukan frekuensi yang diinginkan yaitu 3,5 GHz dan menentukan substrat yang akan digunakan yakni RT Duroid R5880 dengan nilai konstanta dielektrik 2,2, ketebalan 1,575 mm, dan *loss tangen* sebesar 0,0009 [5], penggunaan substrat jenis ini bertujuan untuk menghasilkan antena yang memiliki efisiensi yang baik karena *loss* dari substrat jenis duroid sangatlah kecil.

Gambar 1 merupakan diagram alir dari perancangan antena yang akan dibuat. Tahapan awal perancangan antena dengan menentukan serta menghitung dimensi *patch*, dimensi *enclosure*, dan dimensi saluran pencatu. Selanjutnya, melakukan simulasi terhadap antena yang sudah dirancang dengan menggunakan *software*. Setelah diperoleh bentuk dan parameter yang diinginkan yakni, *return loss* $\leq$ -10 dB , *isolation loss* $\leq$ -20 dB, *bandwidth* $\geq$ 200 MHz, VSWR $\leq$ 2, *gain* $\geq$ 5 dB, ECC $\leq$ 0,5, DG 10 dB [14], dan pola radiasi *directional* maka dapat dilakukan tahapan berikutnya dengan melakukan iterasi jarak antar *patch* antena agar mendapatkan nilai *gain* yang optimal. Untuk memperoleh hasil yang lebih optimal pula pada setiap parameter dilakukan iterasi terhadap dimensi saluran pencatu. Pada proses simulasi perancangan antena ini menggunakan perangkat lunak AWR Microwave Office 2009. Dari hasil simulasi yang didapatkan kemudian akan dianalisis pengaruh dari perubahan masing-masing dimensi pada antena terhadap nilai parameter. Hasil analisa dilakukan untuk melihat performansi dari antena yang diusulkan dan kelayakan untuk diterapkan pada sistem komunikasi 5G.

Penambahan *slit* pada antena mikrostrip MIMO berdampak terhadap *bandwidth* dan mereduksi. Hal ini ditunjukkan pada penelitian sebelumnya yang diusulkan oleh [15] bahwa penambahan *slit* berhasil meningkatkan *bandwidth* 22%. Selanjutnya, penerapan antena MIMO 2 *port* juga berhasil meningkatkan *gain* 49,52 % dibandingkan dengan antena elemen tunggal.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

B. Perancangan Antena

Pada tahapan awal yakni merancangan antena mikrostrip *single elemen* berbentuk segi empat seperti pada Gambar 2. Untuk memperoleh dimensi *patch* dan *enclosure* maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (1) sampai dengan persamaan (7) [16].

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_{r+1}}{2} + \frac{\varepsilon_{r-1}}{2}\left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0.412h\left(\frac{\varepsilon_{reff}+0.3}{\varepsilon_{reff}+0.258}\right)\left(\frac{\frac{W}{h}+0.264}{\frac{W}{h}+0.8}\right) \quad (4)$$

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

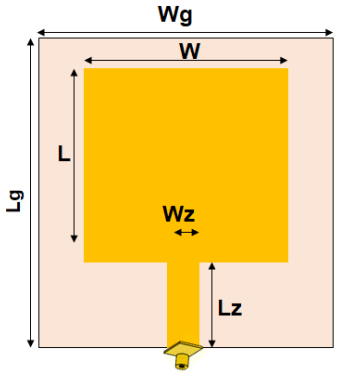
$$Lg = 6h + L \quad (6)$$

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

Keterangan:

W = Lebar *patch* antena (m)
L_{eff} = Panjang efektif *patch* antena (m)
ε_{reff} = Konstanta dielektrik efektif (m)
ΔL = Pertambahan panjang *patch* (m)
h = Ketebalan substrat (mm)
f = Frekuensi (Hz)
L = Panjang *patch* antena (m)
Lg = Lebar *enclosure* (m)
Wg = Panjang *enclosure* (m)

Untuk mereduksi serta menambah *bandwidth* dari antena maka ditambahkan metode *slit.* Metode *slit* yakni teknik belahan berupa celah pada bagian tepi elemen peradiasi *(patch)* atau bidang pentanahan *(ground plane)* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Desain antena *single elemen*

Umumnya untuk lebar *slit* (Ws) berkisar antara 1 - 6 mm, sedangkan untuk panjang *slit* (Ls) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan pada (7)[17]:

$$Ls = 0{,}15 \; x \; L \quad (7)$$

Kemudian agar mendapatkan hasil *gain* yang lebih maksimal maka dapat dilakukan dengan teknik *array*. Karena jumlah elemen yang digunakan lebih dari satu maka harus ditentukan jarak antar elemen (d) yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (8) [17]:

$$d = \frac{\pi}{2} = \frac{c}{2f} \quad (8)$$

Dalam melakukan teknik *array* diperlukan perhitungan matematis untuk lebar saluran pencatu 50 Ω, 70,7 Ω, dan 100 Ω serta jarak antar elemen peradiasi (*patch*) yang dapat dilihat pada persamaan (9) dan (10) [18].

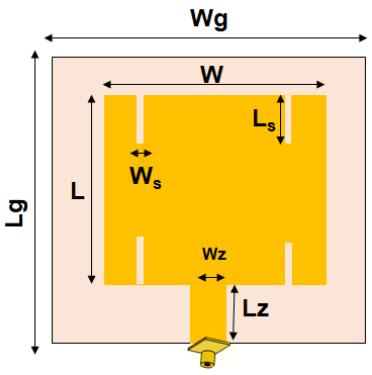
$$B = \frac{60\pi^2}{Z_O\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \quad (9)$$

$$Wz = \frac{2h}{\pi}\left\{B - 1 - \ln(2B-1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r}\left[\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0{,}61}{\varepsilon_r}\right]\right\} \quad (10)$$

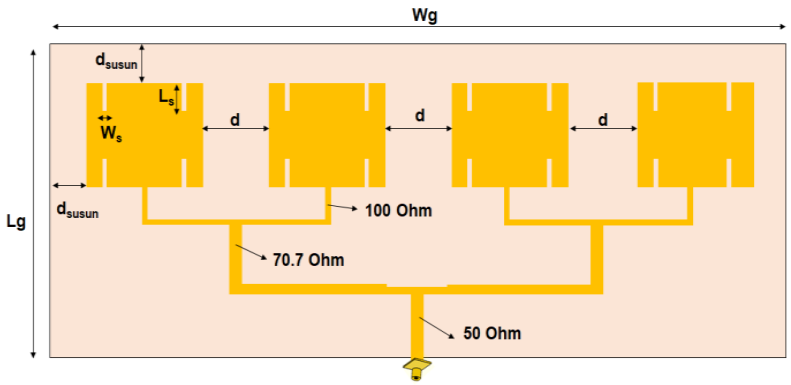
Keterangan:

B = Konstanta saluran pencatu mikrostrip
Wz = Lebar saluran pencatu (m)
ε_r = Konstanta dielektrik

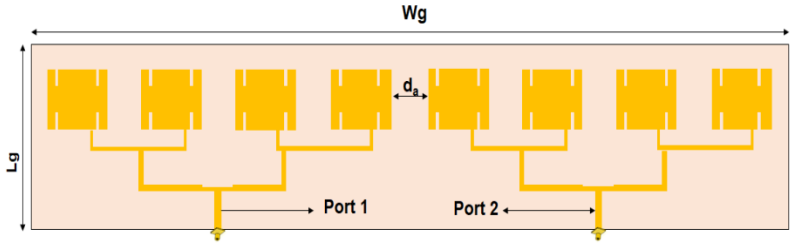
Berdasarkan persamaan yang dipaparkan, maka didapatkan desain antena mikrostrip *array* 2x2 dengan metode *slit* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



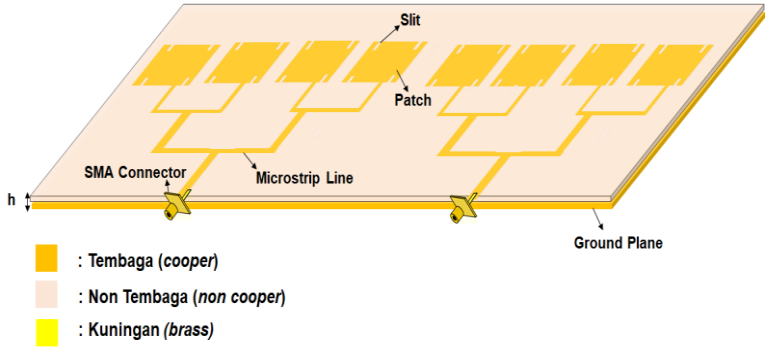
Gambar 3. Desain antena dengan metode *slit*



Gambar 4. Desain antena *array* 2x2 dengan metode *slit*



Gambar 5. Desain antena *array* MIMO *2x2* dengan metode *slit*



Gambar 6. Struktur antena *array* MIMO *2x2* dengan metode *slit*

Tabel 1. Ukuran dimensi antena 2x2 *slit array*

Parameter	Keterangan	Dimensi
W	Lebar *patch*	34 mm
L	Panjang *patch*	28 mm
Lg	Panjang *enclosure*	38 mm
Wg	Lebar *enclosure*	43 mm
Ls	Panjang *Slit*	1 mm
Ws	Lebar *Slit*	5,8 mm
d	Jarak antar *patch*	43 mm
$W_{50\Omega}$	Lebar saluran pencatu 50 Ω	5 mm
$L_{50\Omega}$	Panjang saluran pencatu 50 Ω	34 mm
$W_{70,7\Omega}$	Lebar saluran pencatu 70,7 Ω	3 mm
$L_{70,7\Omega}$	Panjang saluran pencatu 70,7 Ω	59 mm
$W_{100\Omega}$	Lebar saluran pencatu 100 Ω	1 mm
$L_{100\Omega}$	Panjang saluran pencatu 100 Ω	11 mm

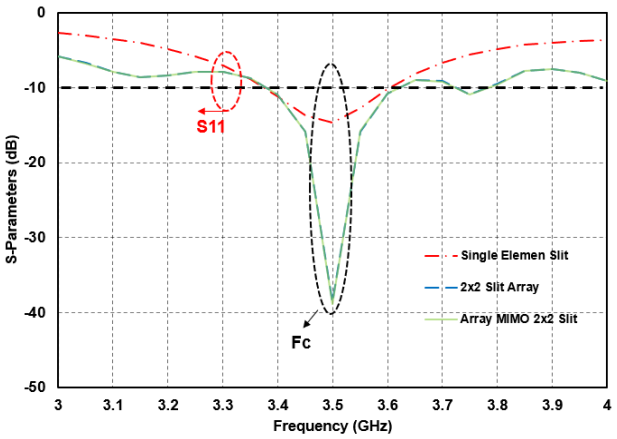
Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan maka didapatkan nilai parameter untuk lebar pencatu masing-masing adalah $W_{50\Omega}$ = 5 mm, $W_{70,7\Omega}$ = 3mm, dan $W_{100\Omega}$ = 1 mm. Dimensi dari keseluruhan (*enclosure*) antena *array* 2x2 dengan metode *slit* adalah 38 x 43 mm dengan jarak antar *patch* 43 mm, dan dimensi dari *patch* antena yakni 28 x 34 mm. Untuk lebih jelasnya ukuran dimensi keseluruhan dari antena dapat dilihat pada Tabel 1. Selanjutnya untuk meningkatkan level penerimaan pada aplikasi *multiuser* maka antena akan ditambahkan pula metode MIMO. Hal ini juga dilakukan dengan tujuan sebagai penguatan *gain.* Desain dan struktur antena MIMO dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Antena pada *port* 1 dan *port* 2 dipisahkan dengan jarak d yaitu 40 mm. Hal ini bertujuan untuk mengontrol nilai koefisien isolasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

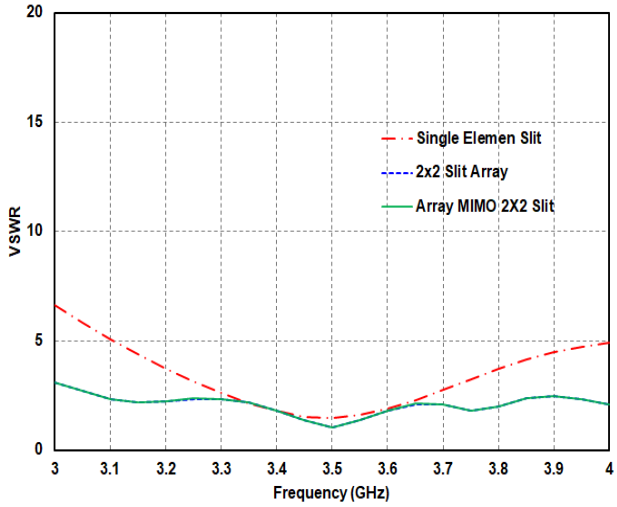
Dari hasil perancangan yang telah dilakukan sebelumnya, kemudian akan dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* CST 2019 untuk melihat hasil yang didapatkan dari antena yang telah dirancang. Hasil *return loss* dan VSWR dari perancangan antena *single elemen slit*, 2x2 *slit array*, dan *array* MIMO 2x2 *slit* dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.

Dari hasil simulasi pada Gambar 7 diketahui bahwa desain antena MIMO 2x2 *array* dengan *slit* mempunyai nilai *return loss* yang sangat baik yakni -38,89 dengan frekuensi kerja 3,5 GHz. Peningkatan nilai *return loss* dikarenakan antena yang disusun secara *array* memiliki lebih dari dua elemen sehingga penyerapan daya juga menjadi lebih baik sehingga nilai *return loss* menjadi lebih bagus. Itu berarti daya yang diserap lebih besar daya yang dipantulkan (*reflected*) antena mikrostrip *array* MIMO 2x2 dengan metode *slit.* Pada Gambar 8 terlihat bahwa nilai VSWR berbanding lurus dengan nilai *return loss* dimana apabila daya yang diserap lebih besar daripada yang dipantulkan (*reflected*) maka nilai VSWR juga akan semakin baik, sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi saluran impedansi masukan (Zo) sesuai dengan impedansi beban (Z_L). Antena yang telah dirancang telah memenuhi nilai VSWR telah memenuhi spesifikasi yang diinginkan yakni ≤ 2. Untuk lebih jelasnya melihat hasil perbandingan *return loss* dan VSWR antara *single* elemen *slit, array* 2x2 *slit*, dan *array* MIMO 2x2 *slit* dapat dilihat pada Tabel 2. Dengan menggunakan metode *slit* dan *array* meningkatkan nilai *return loss* sebesar 62,80% dan VSWR 29,45 %.

Kemudian didapatkan pula hasil *gain* antar antena seperti pada Gambar 9. Dari hasil yang diperoleh pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa *gain* yang dihasilkan pada antena *single* elemen adalah 6,44 dB sedangkan pada antena 2x2 *array slit* naik menjadi 8,88 dB, dan pada saat di *array* MIMO 2x2 *slit gain* semakin naik menjadi 11,13 dB. Lebih jelasnya untuk melihat perbandingan perhatikan Tabel 3.



Gambar 7. Perbandingan *return loss* antar antena



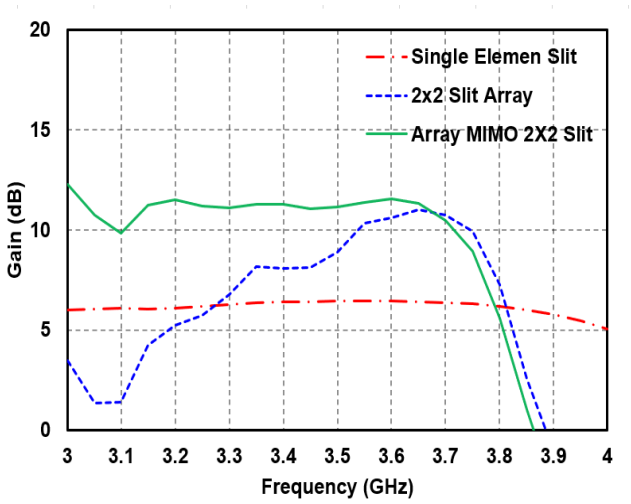
Gambar 8. Perbandingan VSWR antar antena

Tabel 2. Perbandingan *return loss* dan VSWR

Desain antena	*Return loss*	VSWR
Single elemen *slit*	-14,66 dB	1,453
2x2 *slit array*	-38,59 dB	1,023
Array MIMO 2x2 *slit*	-38,89 dB	1,025

Tabel 3. Perbandingan *Gain* Antar Antena

Desain Antena	*Gain*
Single elemen *slit*	6,44 dB
2x2 *slit array*	8,88 dB
Array MIMO 2x2 *slit*	11,13 dB

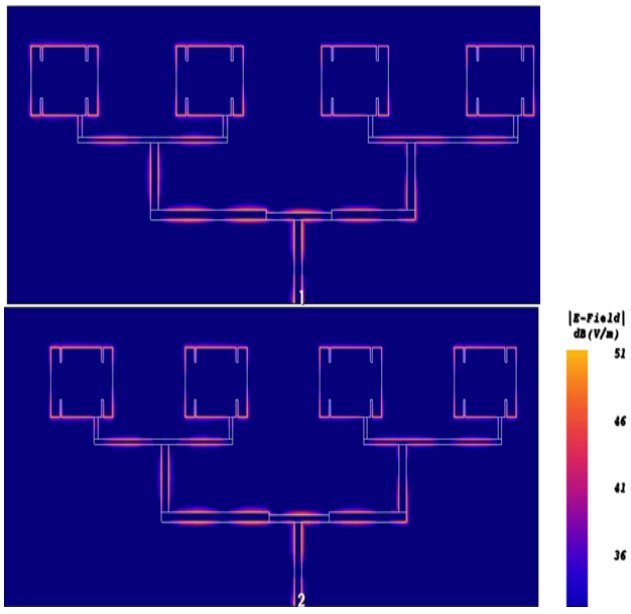


Gambar 9. Perbandingan *gain* antar antena

Dengan metode *array*, nilai *gain* dapat meningkat sekitar 37,88% menjadi 8,88 dB dari antena *single* elemen dan pada saat metode MIMO ditambahkan *gain* semakin bertambah 25,33% menjadi 11,13 dB. Hal ini berarti antena MIMO berhasil meningkatkan *gain* 42,13% dibandingkan *single* elemen. Hal ini berarti sesuai dengan teori dimana salah satu fungsi antena MIMO adalah untuk melakukan penguatan *gain.*

Salah satu parameter untuk melihat kinerja antena adalah distribusi arus dari antena MIMO yang dirancang pada frekuensi kerja 3,5 GHz. Gambar 10 menunjukkan distribusi arus ketika antena dinyalakan secara bersamaan pada *port* 1 dan *port* 2 saling menghasilkan arus tanpa mempengaruhi satu sama lain, hal ini ditunjukkan juga dengan nilai arus yang dihasilkan yakni 51 V/m.

Gambar 11 menunjukkan menunjukkan hasil pola radiasi yang dihasilkan oleh antena *single elemen* dan *array* MIMO 2x2 dengan *slit* dengan jarak d = 40 mm dimana bagian berwarna merah menunjukkan *E Plane* dan warna biru mennjukkan *H Plane*. Terlihat bahwa antena *array* MIMO 2x2 dengan *slit* memiliki sudut berkas pancaran yang lebih sempit karena nilai *gain* yang semakin tinggi. Akibat penyempitan sudut berkas pancaran maka munculnya *side lobe* yang terletak disamping *main lobe*. Penambahan *slit* pada pada *patch* juga berhasil mereduksi dimensi antena menjadi lebih kecil daripada tanpa menggunakan *slit.* Perbandingan dimensi antena dengan menggunakan *slit* dan tanpa *slit* ditunjukkan padaTabel 4.



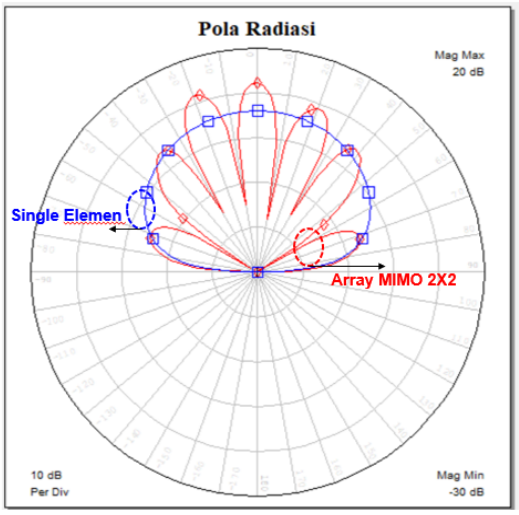
Gambar 10. Distribusi arus antena *array* MIMO 2x2 dengan *slit*

Tabel 4 menunjukkan bahwa antena *array* MIMO 2x2 dengan *slit* mempunyai dimensi *patch* sebesar 28 mm x 34 mm dan dimensi *enclosure* 120 mm x 575 mm, sedangkan tanpa *slit* mempunyai dimensi *patch* 27,8 mm x 37 mm dan dimensi *enclosure* 155 mm x 628 mm. Dengan demikian, berdasarkan data pada Tabel 4 bahwa antena *array* MIMO 2x2 dengan *slit* berhasil mereduksi *patch* sebesar 7,44% dan *enclosure* sebesar 28,99%. Pada antena MIMO juga terdapat beberapa parameter penting yakni salah satunya adalah *Envelope Correlation Cofficient* (ECC) dengan nilai ambang batas 5 dB untuk tiap frekuensi dan *Diversity Gain* (DG) nilai maksimal adalah 10 dB.

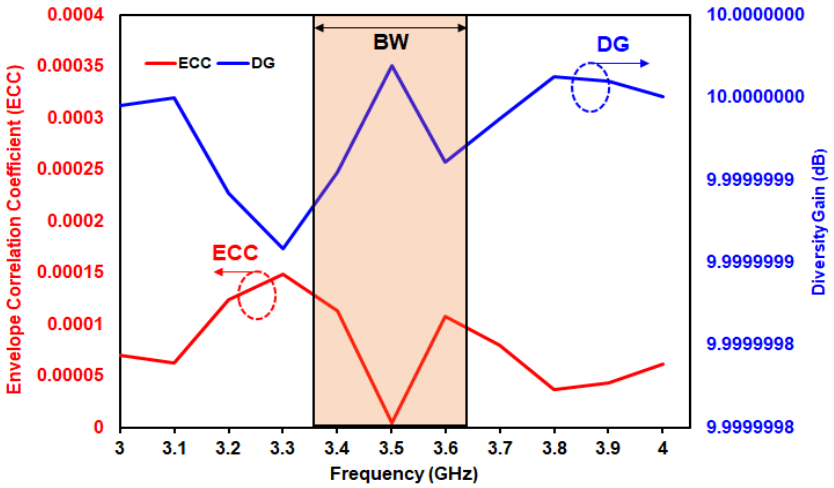
Pada penelitian ini antena *array* MIMO 2x2 dengan metode *slit* berhasil menghasilkan nilai ECC sebesar 0,00004 dengan nilai DG 10 dB pada frekuensi kerja 3,5 GHz. Sehingga dari hasil tersebut dapat dinyatakan bahwa antena yang dirancang telah memenuhi ambang batas yang dipersyaratkan untuk antena MIMO. Pada Gambar 14 juga menunjukkan bahwa nilai DG yang tinggi didapatkan pada saat ECC berada pada nilai terendah begitu juga sebaliknya. Hal ini mengartikan ketika nilai korelasi antar *port* dari antena MIMO bernilai kecil maka penguatan dan keterarahan antena juga menjadi optimal.

Tabel 4. Perbandingan dimensi antena MIMO dengan *slit* dan tanpa *slit*

Antena *array* MIMO 2x2 dengan *slit*		**Antena *array* MIMO 2x2 tanpa *slit***	
Dimensi enclosure	**Dimensi *patch***	***Dimensi enclosure***	**Dimensi *patch***
120mm x 576mm	28mm x 34mm	155mm x 628mm	27,8mm x 37mm



Gambar 11. Pola radiasi *single* elemen vs antena *array* MIMO 2x2 dengan *slit*



Gambar 14. Hasil ECC dan DG

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan hasil simulasi yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan bahwa antena mikrostrip *array* MIMO 2x2 dengan metode *slit* telah berhasil memenuhi spesifikasi yang diinginkan untuk sistem komunikasi 5G. Hasil simulasi nilai *return loss* -38,89 dB, *isolation loss* -74,34 dB *bandwidth* 241 MHz, VSWR 1,025, *gain* 11,13 dB, dan pola radiasi *directional*. Penerapan antena mikrostrip *array* MIMO 2x2 dengan metode *slit* berhasil mendapatkan *gain* sebesar 11,13 dB yakni meningkat 25,33% daripada antena *array* 2x2 *slit* dan meningkat 42,13% dibandingkan single elemen *slit*. Perbandingan reduksi yang dihasilkan oleh antena mikrostrip *array* MIMO 2x2 dengan *slit* dan tanpa *slit* yakni untuk patch sebesar 7,44% dan *enclosure* 28,99%. Perancangan antena *array* MIMO 2x2 dengan metode *slit* memiliki nilai ECC sebesar 0,00004 dan DG sebesar 10 dB. Ini berarti nilai ECC dan DG telah memenuhi ambang batas yang dipersyaratkan untuk antena MIMO.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu tersusunnya penelitian khususnya kepada Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti yang telah memberikan sarana dan juga dukungan sehingga penelitian ini dapat terealisasikan.

REFERENSI

[1] A. F. S. Admaja, "Pemetaan Riset Teknologi 5G [5G Technology Research Mapping]," *Bul. Pos dan Telekomun.*, vol. 16, no. 1, p. 27, 2018.

[2] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip antenna design handbook*. Artech house, 2001.

[3] M. A. Soliman, T. E. Taha, W. Swelam, and A. Gomaa, "3.5/5 GHz dual-band 8 × 8 adaptive array antenna," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 34, no. August 2012, pp. 85–98, 2012.

[4] S. Kundu, "High gain compact ultra-wideband 'antenna-frequency selective surface' and its performance evaluation in proximity of soil surface," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 63, no. 3, pp. 869–875, 2021.

[5] D. Mitra, B. Ghosh, A. Sarkhel, and S. R. B. Chaudhuri, "A miniaturized ring slot antenna design with enhanced radiation characteristics," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 1, pp. 300–305, 2016.

[6] T. K. Putri and S. Alam, "Miniaturisasi antena mikrostrip array 4× 1 elemen menggunakan teknik peripheral slits," *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)* vol. 1, no. 2, pp. 115-122, 2021.

[7] P. S. Naik and H. G. Virani, "1× 4 Microstrip Patch Slotted Array Antenna for 5G C-Band Access Point Application," *2020 Int. Conf. Electron. Sustain. Commun. Syst.*, pp. 641–644, 2020.

[8] S. Gundala, V. SrinivasaBaba, A. Vijaya, and S. Machanna, "Compact High Gain Hexagonal Fractal Antenna for 5G applications," in *2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, 2019, pp. 1–7.

[9] K. Da Xu, J. Zhu, S. Liao, and Q. Xue, "Wideband Patch Antenna Using Multiple Parasitic Patches and Its Array Application With Mutual Coupling Reduction," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 42497–42506, 2018.

[10] Y. I. Abdulkarim *et al.*, "Design of a broadband coplanar waveguide-fed antenna incorporating organic solar cells with 100% insolation for ku band satellite communication," *Materials (Basel).*, vol. 13, no. 1, 2020.

[11] S. Alam, L. Sari, I. Surjati, and N. Onasie, "Miniaturisasi Antena Mikrostrip Pencatu Ganda Menggunakan Metode Peripheral Slit," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 17, no. 1, pp. 15–19, 2021.

[12] A. Nabilah, H. Ludiyati, D. Saefudin, J. T. Elektro, P. N. Bandung, and K. Kunci, "Peningkatan Kinerja Gain Antena Mikrostrip 4x4 MIMO Menggunakan Dielektrik Termodifikasi pada Frekuensi 1800 MHz," *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, pp. 26–27, 2020.

[13] E. SANDI, W. DJATMIKO, and R. K. PUTRI, "Desain U-slot Ganda untuk Meningkatkan Bandwidth Antena MIMO 5G Millimeter-wave," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 8, no. 1, p. 150, 2020.

[14] L. M. Ramadhan, R. P. Astuti, and B. S. Nugroho, "Simulation of Design and Analysis Massive MIMO Array Microstrip Rectangular Patch Dualband 3.5 GHz and 26 GHz for 5G Communications," in *2019 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, 2019, pp. 28–32.

[15] F. Solehudin, Z. Aulia, S. Alam, L. Sari, and I. Surjati, "Design of 2x1 MIMO Microstrip Antenna Using Slit and Inset Technique For 5G Communication," *JITE (Journal of Informatics and Telecommunication Engineering)*, vol. 5, no. July, 2021.

[16] M. Alaydrus, "Riset Antena – State of the Art," *J. Telekomun. dan Komput.*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2017.

[17] I. Surjati, *Antena Mikrostrip: Konsep dan Aplikasinya*. DKI Jakarta: Universitas Trisakti, 2010.

[18] D.-G. Fang, *Antenna theory and microstrip antennas*. CRC Press, 2017.