

Perancangan Antena MIMO *Microstrip* Rectangular Array dengan Slot U

Zikra Aulia Sanaz^{#1}, Syah Alam^{#2}, Indra Surjati^{#3}

[#]Program Studi Teknik Elektro, Universitas Trisakti
Jl. Kyai Tapa No.1, Kota Jakarta Barat, Indonesia

¹zikra062001904033@std.trisakti.ac.id

²syah.alam@trisakti.ac.id

²indra@trisakti.ac.id

Abstract— The 5th generation (5G) is expected to meet the needs of telecommunications technology in the future. According to the Research Team of the SDPPI Research and Development Center for Resources and Equipment for Post and Information Technology, the Ministry of Communications and Informatics has several advantages, namely: high data rate, reduced latency, increased capacity of connected devices, and more energy-efficient. Microstrip antenna for wireless communication has several drawbacks such as low gain, poor directionality, and multipath fading. Selection of multi-antenna by applying massive MIMO on eMBB to avoid multipath fading, provide gain, and greater capacity to serve many users simultaneously. In Indonesia, based on the Indonesian Radio Frequency Spectrum Table, the priority is in the 3.4-4.2 GHz frequency range. The substrate used is RT Duroid 5880 with a dielectric constant of 2.2. The patch used is rectangular with slots to increase the antenna bandwidth. In this study, the performance of the MIMO antenna has reached the target, where the antenna isolation loss is -63.16 dB so that the correlation coefficient value is 3.97×10^{-7} , and the diversity gain is 10 dB.

Keywords— multi-antenna, microstrip antenna, slot U, rectangular array, MIMO antenna, 5G

Abstrak— Generasi kelima (5G) diharapkan dapat memenuhi kebutuhan teknologi telekomunikasi di masa depan. Beberapa kelebihan yang dimiliki teknologi Generasi Kelima (5G), menurut Tim Peneliti Puslitbang SDPPI (Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Informatika) Kemkominfo, yaitu: data rate tinggi, mengurangi latency, meningkatkan kapasitas perangkat terhubung, dan lebih hemat energi. Antena *microstrip* memiliki beberapa kekurangan, yaitu gain yang rendah, keterarahan yang kurang baik, dan *multipath fading*. Pemilihan multi-antena dengan cara mengaplikasikan *massive MIMO* pada eMBB digunakan untuk menghindari *multipath fading*, memberikan gain, dan kapasitas yang lebih besar untuk melayani user yang banyak secara bersamaan. Di Indonesia, berdasarkan Tabel Spektrum Frekuensi Radio Indonesia, diutamakan dalam rentang frekuensi 3,4—4,2 GHz. Substrat yang digunakan yaitu RT Duroid 5880 dengan konstanta dielektrik 2,2. Patch yang digunakan adalah *rectangular* dengan penambahan slot pada patch tersebut untuk meningkatkan bandwidth antena. Pada penelitian ini kinerja antena MIMO yang didapatkan telah mencapai target, di mana besar *isolation loss* antena sebesar -63,16 dB sehingga didapatkan nilai koefisien korelasi sebesar $3,97 \times 10^{-7}$, dan *diversity gain* sebesar 10 dB.

Kata Kunci— multi-antena, antena *microstrip*, slot U, rectangular array, antena MIMO, 5G

I. PENDAHULUAN

Kelebihan dari teknologi 5G adalah data rate yang meningkat dan bandwidth yang sangat lebar. Berdasarkan [1] sistem komunikasi 5G dibagi menjadi beberapa band, yaitu untuk high-band 28 GHz, mid-band 15 GHz, dan low-band 3,5 GHz. Rentang pita frekuensi dari 3,3 GHz hingga 4,2 GHz merupakan salah satu kandidat untuk teknologi 5G di dunia. Di Indonesia, berdasarkan [2], salah satu kandidat pita untuk 5G berada pada rentang frekuensi dari 3,4 GHz hingga 3,6 GHz.

Salah satu antena yang banyak dikembangkan untuk keperluan sistem komunikasi nirkabel adalah antena *microstrip*. Antena *microstrip* memiliki kelebihan, yaitu bentuknya yang sederhana, biaya fabrikasi yang terjangkau, serta kemampuannya untuk dapat bekerja pada frekuensi tinggi. Namun, antena *microstrip* memiliki beberapa kekurangan, seperti gain yang rendah, keterarahan yang kurang baik, bandwidth kecil, dan kerap kali menimbulkan *multipath fading* [3]. Dengan adanya kekurangan tersebut, agar dapat melayani pelanggan secara optimal, maka diperlukan multi-antena yang bekerja pada sistem MIMO agar kualitas layanan dan konektivitas lebih baik [4].

Pengembangan antena *microstrip* MIMO untuk sistem komunikasi Generasi Kelima telah dipaparkan pada beberapa penelitian sebelumnya [5]. Pada penelitian tersebut telah berhasil dirancang antena MIMO empat elemen yang dapat bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dengan *return loss* di atas 10 dB, *isolation loss* -18,8 dB, dan gain sebesar 2 dBi. Dari penelitian [5] antena yang telah dirancang masih menghasilkan gain dan keterarahan yang rendah sehingga masih dibutuhkan optimalisasi.

Proses optimasi yang dapat dilakukan terhadap antena *microstrip* adalah dengan menambahkan metode array, seperti pada penelitian [6] dan [7]. Pada penelitian [6] dilakukan perancangan antena *microstrip* SISO (*Single Input Single Output*) dengan metode optimalisasi array yang disusun secara *parallel feed*. Antena tersebut menghasilkan gain sebesar 11,8 dB. Pada penelitian [7] dilakukan perancangan antena *microstrip* SISO yang disusun secara *series feed*. Gain yang didapatkan adalah sebesar 8,8 dB. Dari kedua penelitian

tersebut didapatkan bahwa antena *array* dengan saluran yang disusun secara paralel menghasilkan *gain* yang lebih baik daripada saluran yang disusun seri. Namun, peningkatan *gain* pada proses optimalisasi antena dengan metode *array* berdampak pada *bandwidth* antena yang mengecil. Oleh karena itu, diperlukan optimalisasi agar didapatkan rancangan antena yang optimal.

Mengacu pada penelitian [8], untuk meningkatkan *bandwidth* antena, dilakukan perancangan antena *microstrip* SISO dengan menambahkan *slot* berbentuk *U* pada antena. Selain peningkatan *bandwidth*, mengacu kepada penelitian [9], juga akan didapatkan antena dengan dimensi yang lebih kecil. Antena *microstrip* dengan SISO dapat diminiaturisasi setelah ditambahkan *slot U*. Maka dari itu, mengacu pada penelitian [6] [7] [8] dan [9], dapat dilakukan suatu proses untuk mengoptimalkan kinerja antena *microstrip* SISO. Pengoptimalan kinerja antena juga dapat dilakukan dengan multi-antena.

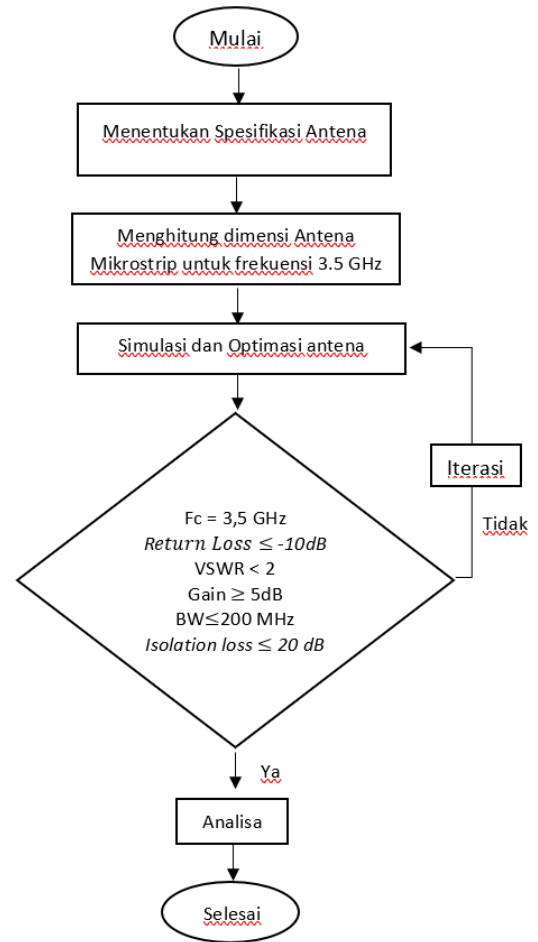
Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dipaparkan dan beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan, maka dalam penelitian ini dilakukan perancangan *microstrip* MIMO 2x2 dengan metode *array* untuk meningkatkan *gain* dan keterarahan antena. Antena ini akan digunakan untuk keperluan sistem komunikasi 5G dengan kandidat frekuensi sesuai pita frekuensi yang ada pada [1]. Antena yang akan dirancang ini diharapkan memiliki nilai *return loss* ≤ -10 dB, *bandwidth* ≤ 200 MHz, *VSWR* ≤ 2 , *gain* > 5 dB, *diversity gain* ≈ 10 dB, dan *isolation loss* ≤ 20 dB.

II. METODOLOGI

Pada proses perancangan antena dilakukan beberapa tahapan agar didapatkan antena sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Proses perancangan antena yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Tahapan awal dalam merancang antena adalah menentukan frekuensi kerja dan substrat antena. Setelah itu, tahapan berikutnya adalah menghitung dimensi antena.

Pada penelitian ini dilakukan perancangan antena *microstrip rectangular* dengan menggunakan perangkat lunak. Setelah didapatkan antena dengan spesifikasi yang telah ditentukan, proses perancangan dilanjutkan dengan menambah *slot U* pada *patch* antena. Penambahan *slot U* ini diharapkan dapat meningkatkan *bandwidth* antena dan mereduksi dimensi antena. Apabila penambahan *slot* telah berhasil mencapai parameter yang diinginkan, langkah selanjutnya adalah merancang antena dengan metode *array*. Penambahan metode *array* ini diharapkan dapat meningkatkan *gain* dan keterarahan radiasi antena. Target yang diinginkan pada proses optimalisasi dengan penambahan metode *slot U* dan *array* ini adalah nilai *return loss* ≤ -10 dB, *bandwidth* ≤ 200 MHz, *VSWR* ≤ 2 , *gain* > 5 dB, dan pola radiasi *directional*. Setelah nilai dari parameter-parameter tersebut didapatkan, maka dilanjutkan dengan proses penyusunan antena menjadi sebuah antena MIMO. Target perancangan antena MIMO adalah nilai *isolation loss* ≤ 20 dB. Nilai *isolation loss* ini a-

A. Perancangan Antena



Gambar 1 Diagram alir perancangan

kan berpengaruh kepada nilai koefisien korelasi dan *diversity gain* dari antena.

Antena untuk 5G yang dirancang dalam penelitian ini bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dan menggunakan substrat Duroid RT5880 dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) 2,2, ketebalan (h) 1,575 mm, dan *loss-tangen* sebesar 0,0009. Penggunaan substrat ini dikarenakan *loss-tangen* yang kecil dan substrat yang relatif tipis. Spesifikasi substrat ini perlu diperhatikan karena akan mempengaruhi efek gelombang permukaan (*surface wave*). Semakin kecil nilai *loss-tangen*, maka efisiensi antena, *gain*, dan radiasi *end-fire* antena dapat dioptimalkan [10].

Perancangan antena diawali dengan menghitung dimensi antena *microstrip rectangular*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dalam merancang antena *microstrip rectangular* digunakan persamaan (1) hingga persamaan (9).

$$W_p = \frac{C}{2f \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \cdot \frac{h}{W_p} \right]^{-2} \quad (2)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{C}{2f\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0,412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0,3) \left(\frac{W_p}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0,258) \left(\frac{W_p}{h} + 0,8 \right)} \quad (4)$$

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

$$L_s \geq 6 \cdot h + L_p \quad (6)$$

$$W_s \geq 6 \cdot h + W_p \quad (7)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (8)$$

$$W_f = \frac{2h}{\pi} \left(B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r + 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \right) \quad (9)$$

W_p adalah lebar patch antenna dalam mm, L_p adalah panjang patch antenna dalam mm, L_{eff} adalah panjang efektif patch antenna dalam mm, ϵ_{reff} adalah konstanta dielektrik efektif, ΔL adalah penambahan panjang patch dalam mm, f adalah frekuensi dalam Hz, L_s dalam panjang substrat, dan W_s adalah lebar substrat.

Untuk mendapatkan *bandwidth* optimal yang dapat bekerja pada frekuensi 5G, digunakan metode penambahan slot berbentuk U pada patch antenna menggunakan persamaan (10) hingga persamaan (12). Persamaan tersebut untuk menentukan dimensi slot U pada antenna. Parameternya adalah F untuk lebar slot U, C untuk panjang vertikal slot U, dan D untuk

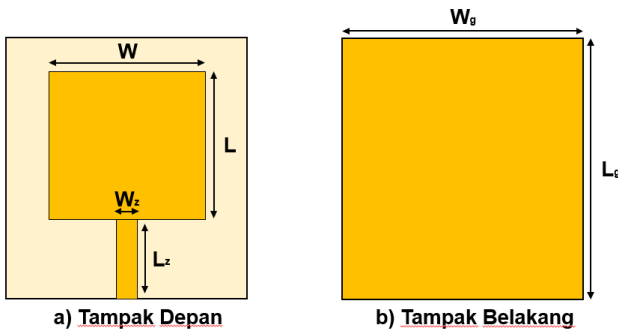
panjang horizontal slot U. Bentuk antenna *microstrip rectangular* dengan slot U dapat dilihat pada Gambar 3.

$$F = \frac{\lambda_0}{60} \quad (10)$$

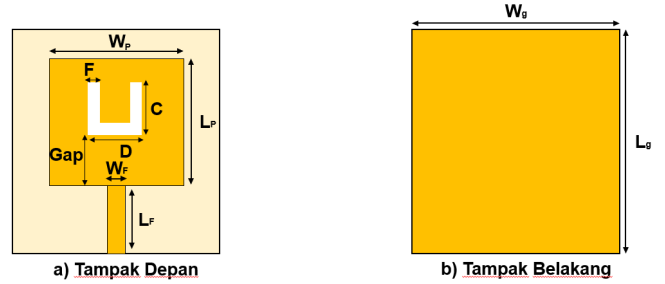
$$C = 0,3 \cdot W_p \quad (11)$$

$$D = \frac{c}{\sqrt{2,08 \times 3,3 \times 10^9}} - 2(L + 2\Delta L - 1,425) \quad (12)$$

Jika sudah mendapatkan *bandwidth* yang optimal, langkah selanjutnya adalah mengoptimalkan kinerja *gain* dan keterarahan dari antenna dengan metode *array*. Metode *array* yang digunakan adalah *array parallel feed*. Dalam merancang antenna *array parallel feed*, saluran transmisinya menggunakan teknik *power divider T-junction*. Teknik ini membantu untuk menghasilkan kondisi *matching impedance* pada antenna *array*. Proses yang dilakukan dalam merancang antenna *array* adalah menghitung dimensi saluran 50 Ω ; 70,7 Ω ; dan 100 Ω . Hasil perancangan antenna *array rectangular* ini dapat dilihat pada Tabel I dan Gambar 4.



Gambar 2 Desain antenna *microstrip rectangular*



Gambar 3 Desain antenna *microstrip rectangular* dengan slot U

TABEL I
DIMENSI ANTENA RECTANGULAR ARRAY MICROSTRIP DENGAN SLOT U

No.	Parameter	Keterangan	Dimensi (mm)
1	W_s	lebar substrat	68
2	L_s	panjang substrat	81
3	W_p	panjang patch antenna	25
4	L_p	lebar patch antenna	28
5	W_f	lebar saluran 50 Ω	3
6	L_f	panjang saluran 50 Ω	16
7	E	lebar slot u	0,8
8	C	panjang slot u vertikal	16,1
9	D	panjang slot u horizontal	21,8
10	W_z	lebar saluran transmisi 70,7 Ω	2
11	L_z	panjang saluran transmisi 70,7 Ω	16
12	W_o	lebar saluran transmisi 100 Ω	1
13	W_z	panjang saluran transmisi 100 Ω	16

Jika parameter-parameter antena *single* elemen yang sesuai sudah didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah menyusun antena ke dalam sebuah antena MIMO dengan dimensi substrat 230 mm x 76 mm. Dalam merancang antena MIMO perlu diperhatikan parameter *isolation loss* karena akan berdampak pada nilai koefisien korelasi dan *diversity gain* dari antena. Hasil perancangan ini dapat dilihat pada Gambar 5.

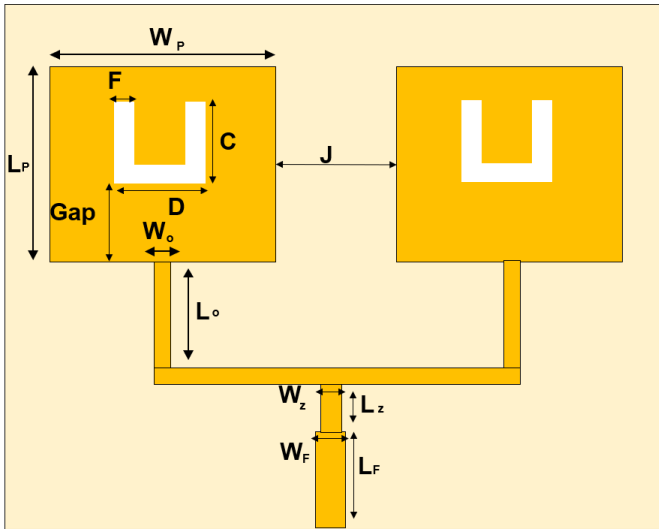
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses perancangan antena dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak AWR *Design Environment* untuk melihat hasil kinerja antena secara simulasi. Pada perangkat lunak juga dapat dilihat dampak penambahan metode *slot U* dan *array*. Pada Gambar 6 terlihat grafik perbandingan *return loss* dan *bandwidth* dari antena *microstrip rectangular* tanpa *slot U* dan dengan *slot U*.

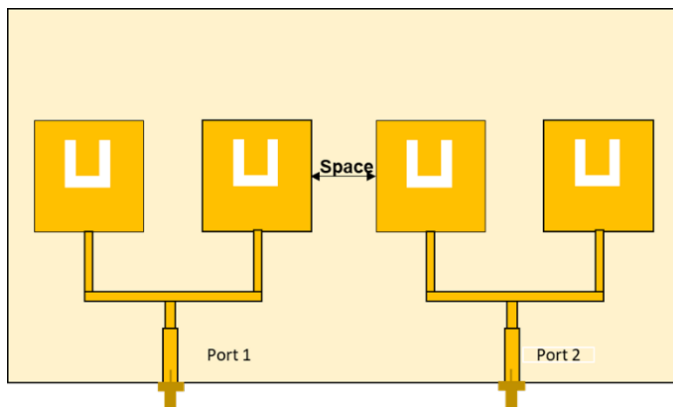
Dari Gambar 6 terlihat bahwa penambahan *slot U* antena mampu memperbesar *bandwidth* antena. Antena *microstrip* tanpa *slot* memiliki *bandwidth* sebesar 159 MHz, sedangkan

antena dengan *slot U* terjadi peningkatan *bandwidth* menjadi 188 MHz. Hal ini berarti penggunaan *slot U* mampu meningkatkan *bandwidth* sebesar 18,39 %. Selain itu, antena juga mengalami reduksi dimensi, di mana antena *microstrip* tanpa *slot U* memiliki dimensi 2.500 mm², sedangkan dimensi antena *microstrip* dengan *slot U* memiliki dimensi 1.536 mm². Hal ini berarti terjadinya penurunan dimensi sebesar 38,6%. Setelah didapatkan nilai *bandwidth* yang optimal dari penambahan *slot U*, maka proses simulasi dilanjutkan dengan menambahkan metode *array* pada antena. Hasil perbandingan *gain* antena *microstrip rectangular* tanpa *slot U*, antena *microstrip rectangular* dengan *slot U*, dan antena *microstrip array rectangular* dengan *slot U* dapat dilihat pada Gambar 7.

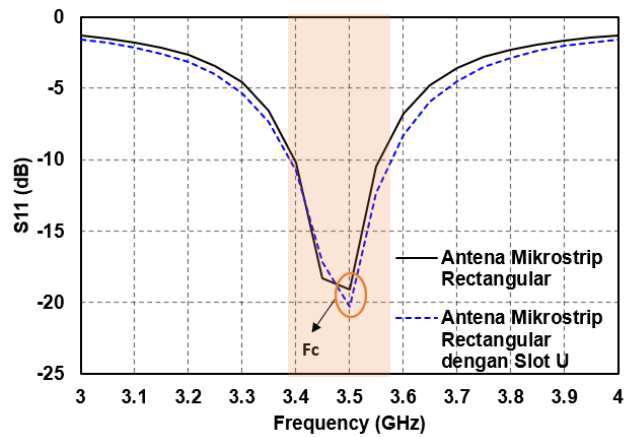
Gambar 7 menunjukkan grafik perbandingan *gain* antena. Terlihat *gain* antena *microstrip rectangular* dengan *slot U* memiliki *gain* terendah dan antena *microstrip array rectangular* dengan *slot U* memiliki *gain* tertinggi. Dari grafik terlihat semakin kecil dimensi antena, maka semakin kecil



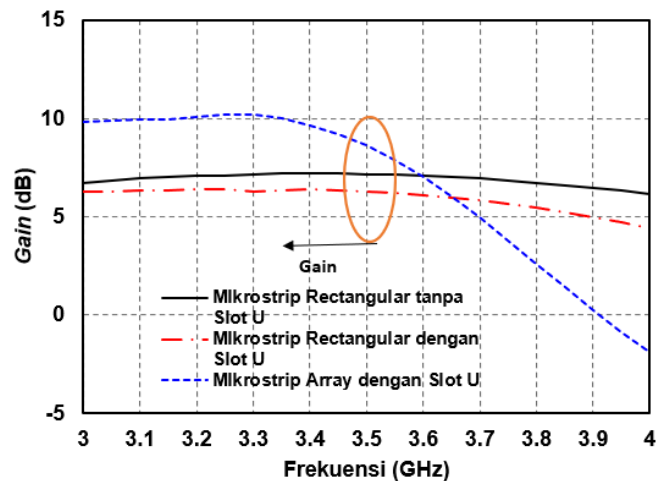
Gambar 4 Desain antena *microstrip rectangular array* dengan *slot U*



Gambar 5 Ilustrasi antena MIMO *microstrip rectangular array* dengan *slot U*



Gambar 6 Perbandingan *return loss* antena *microstrip rectangular* tanpa *slot U* dan dengan *slot U*



Gambar 7 Perbandingan kinerja *gain* antena

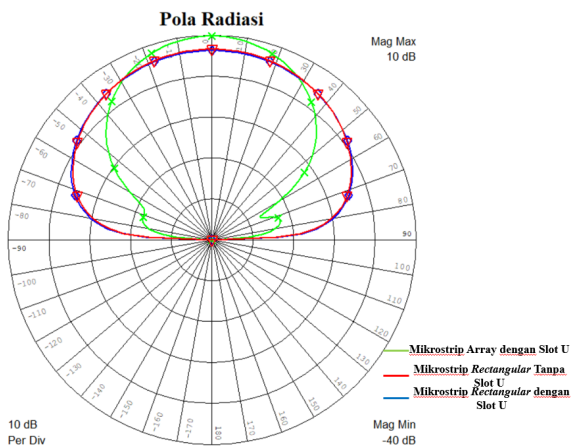
gain yang akan didapatkan. Selain pada gain, metode array juga berdampak pada bentuk pola radiasi antenna yang dapat dilihat pada Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan perbandingan pola radiasi dari masing-masing antenna. Terlihat bahwa pola radiasi antenna array memiliki sudut pancar yang lebih sempit dan lebih tajam jika dibandingkan dengan pola radiasi antenna dengan elemen tunggal. Hal ini disebabkan antenna array mengalami peningkatan gain sehingga sudut pancar mengecil dan semakin tajam, namun menimbulkan side-lobe pada pola radiasinya. Pola radiasi yang semakin tajam dapat menandakan daya pancar antenna semakin besar.

Berdasarkan serangkaian perbandingan yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa antenna microstrip array rectangular 2x1 elemen dengan slot U memiliki kinerja terbaik. Hasil rancangan ini sudah memenuhi target untuk dijadikan antenna yang dapat bekerja di jaringan 5G.

Jika sudah didapatkan antenna SISO yang memenuhi kinerja antenna 5G, proses perancangan dilanjutkan dengan menyusun antenna MIMO. Dalam menyusun antenna MIMO dilakukan simulasi dengan iterasi terhadap jarak antar antenna (space). Jarak antenna pada proses iterasi ini adalah $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{1}{4}\lambda$, dan $\frac{1}{8}\lambda$. Nilai untuk $\frac{1}{2}\lambda$ adalah 40,1 mm; $\frac{1}{4}\lambda$ adalah 20,1 mm; dan $\frac{1}{8}\lambda$ adalah 10,1 mm. Hasil iterasi simulasi jarak antara antenna terlihat pada Tabel II.

Pada Tabel II terlihat bahwa pada masing-masing iterasi memiliki frekuensi tengah yang sama, yaitu 3,5 GHz. Nilai parameter S_{11} dan S_{22} tidak jauh berbeda. Hal ini menunjukkan daya pantul antenna pada port-1 dan pada port-2 memiliki



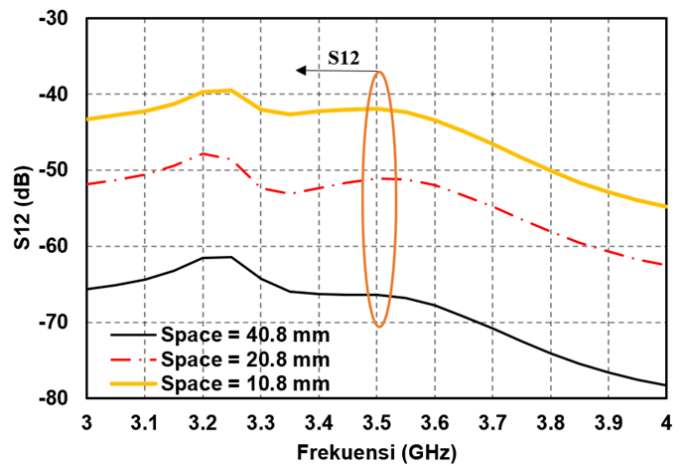
Gambar 8 Perbandingan kinerja pola radiasi antenna

TABEL II
PERBANDINGAN HASIL SIMULASI ITERASI DIMENSI SPACE

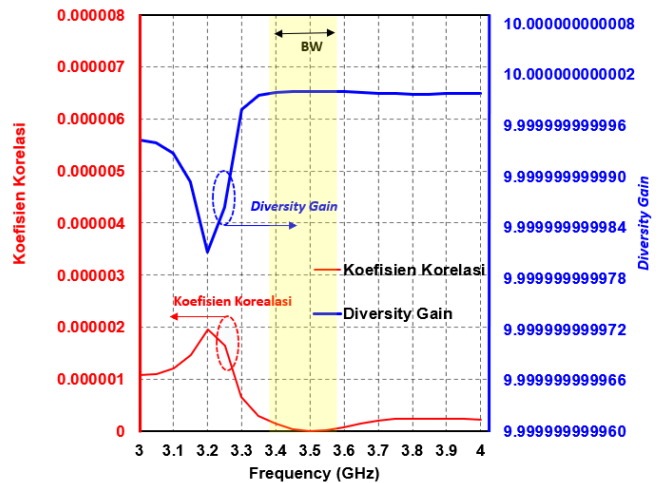
Space (mm)	Parameter				F_c (GHz)
	Return loss		Isolation loss		
	S11 (dB)	S22 (dB)	S12 (dB)	S21 (dB)	
40,1	-21,98	-23,65	-63,16	-63,16	3,5
20,1	-23,04	-21,51	-48,23	-48,23	3,5
10,1	-22,04	-21,51	-38,65	-38,65	3,5

return loss yang hampir sama. Selain mengamati besar return loss pada setiap port antenna, diamati pula besar daya transmisi yang hilang di antara dua port antenna, yaitu isolation loss. Grafik perbandingan isolation loss masing masing iterasi terlihat pada Gambar 9.

Nilai isolation loss yang ditargetkan pada perancangan adalah sebesar ≤ -20 dB. Jika kondisi ini tidak terpenuhi, akan ada interferensi antara elemen antenna yang menyebabkan timbulnya tegangan pada satu elemen dari elemen lain [11]. Dari simulasi ketiga antenna sudah mencapai target yang diinginkan. Terlihat pada Gambar 9, semakin jauh jarak antara antenna, maka semakin kecil pula isolation loss antara antenna. Semakin kecil nilai isolation loss, maka semakin kecil pula rugi-rugi daya di antara antenna sehingga menyebabkan performa antenna menurun. Oleh karena itu, antenna dengan performa terbaik dalam perancangan ini adalah antenna dengan jarak 40,1 mm dengan nilai isolation loss sebesar -63,16 dB pada port-1 dan port-2. Isolation loss yang didapatkan dari simulasi akan digunakan untuk menghitung besar koefisien korelasi dari diversity gain antenna sehingga akan didapatkan grafik yang terlihat pada Gambar 10.



Gambar 9 Perbandingan kinerja isolation loss hasil simulasi iterasi space



Gambar 10 Perbandingan nilai koefisien korelasi dan diversity gain

Gambar 10 menunjukkan bahwa nilai koefisien korelasi dari antena yang diusulkan adalah sebesar $3,97 \times 10^{-7}$ dan nilai *diversity gain* sebesar 10 dB dengan frekuensi tengah 3,5 GHz. Kedua nilai parameter tersebut telah memenuhi target perancangan untuk antena MIMO. Nilai *diversity gain* yaitu nilai yang menunjukkan efektifitas dari sistem *diversity* pada suatu antena MIMO berupa peningkatan *signal-to-noise ratio* (SNR) ataupun penurunan *bit error rate* (BER) [12]. Korelasi antara *diversity gain* dan koefisien korelasi adalah semakin rendah nilai koefisien korelasi, maka nilai *diversity gain* semakin mendekati 10 dB. Hal ini menunjukkan nilai korelasi antar *port* antena rendah, maka penguatan dan keterarahan antena berada pada titik optimal dan bekerja pada frekuensi yang diinginkan, yaitu 3,5 GHz.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini antena *microstrip rectangular* yang dapat bekerja pada frekuensi 5G telah berhasil dirancang. Penambahan metode *slot U* pada antena tersebut mampu meningkatkan nilai *bandwidth* sebesar 18,39% serta mampu mereduksi dimensi antena sebesar 38,6%. Penerapan metode *array* pun mampu meningkatkan *gain* dan keterarahan antena. *Gain* untuk antena *single element* dengan *slot U* adalah sebesar 6,27 dB, sedangkan *gain* untuk antena *array* dengan *slot U* adalah sebesar 8,528 dB dengan pola radiasi yang lebih tajam. Antena MIMO yang dirancang dalam penelitian ini telah mencapai target *isolation loss* antena sebesar -63,16 dB sehingga memperoleh nilai koefisien korelasi sebesar $3,97 \times 10^{-7}$ dan *diversity gain* sebesar 10 dB.

DAFTAR REFERENSI

- [1] A. Hikmaturokhan, K. Ramli, dan M. Suryanegara, "Spectrum Considerations for 5G in Indonesia," dalam *Proceeding - 2018 Int. Conf. ICT for Rural Dev.*, 3 Mei 2019, hlm. 23-28, doi: 10.1109/ICICTR.2018.8706874.
- [2] Tim Peneliti Puslitbang SDPPI, *Studi Sharing IMT dan FSS pada Pita 3,4 - 4,2 GHz*, Puslitbang Sumber Daya, Perangkat, dan Penyelenggaraan Pos dan Informatika, Badan Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Manusia, Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2018.
- [3] S. Alam, I. Surjati, dan T. Firmansyah, "Bandwidth enhancement of square microstrip antennas using dual feed line techniques," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 10, no. 1, hlm. 60-65, 2021, doi: 10.18178/ijeetc.10.1.60-65.
- [4] S. Suyama, T. Okuyama, Y. Inoue, dan Y. Kishiyama, "5G multi-antenna technology," *NTT Docomo Tech. J.*, vol. 17, no. 4, hlm. 29-39, 2016.

- [5] A. Biswas dan V. R. Gupta, "Design and development of low profile MIMO antenna for 5G new radio smartphone applications," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 111, no. 3, hlm. 1695-1706, 2020, doi: 10.1007/s11277-019-06949-z.
- [6] M. Sholeh dan Y. Rahayu, "Perancangan antena MIMO array 37 GHz untuk jaringan komunikasi 5G," *J. Nas. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 2, hlm. 1-9, 2018.
- [7] J. Maharjan dan D. Y. Choi, "Four-element microstrip patch array antenna with corporate-series feed network for 5G communication," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8760297.
- [8] E. Sandi, W. Djatmiko, dan 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, hlm. 150, 2020, doi: 10.26760/elkomika.v8i1.150.
- [9] M. I. L. Prasetyani, S. Alam, dan I. Surjati, "Perancangan antena mikrostrip array menggunakan metode *truncated corner* dengan U-slot pada frekuensi 2,3 GHz," *Jtera (Jurnal Teknol. Rekayasa)*, vol. 6, no. 1, hlm. 85, 2021, doi: 10.31544/jtera.v6.i1.2021.85-92.
- [10] I. Surjati, *Antena Mikrostrip: Konsep dan Aplikasinya*. Universitas Trisakti, 2010.
- [11] M. Yatta, H. Bambang, dan S. Trasma, "Studi analisis antena 2x2 MIMO menggunakan konfigurasi space polarization diversity," dalam *e-Proceeding of Engineering*, vol. 8, 2 April 2021, hlm. 1-12.
- [12] M. A. Soliman, T. E. Taha, W. Swelam, dan A. Gomaa, "3.5/5 GHz dual-band 8x8 adaptive array antenna," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 34, hlm. 85-98, 2013, doi: 10.2528/PIERC12081513.

Zikra Aulia Sanaz, kelahiran kota Jakarta. Menyelesaikan D3 Jurusan Teknik Elektro program studi Teknik Telekomunikasi di Politeknik Negeri Jakarta pada 2018. Saat ini sedang menyelesaikan S1 Program Studi Teknik Elektro.

Syah Alam, lahir di Jakarta pada tanggal 15 April 1986. Menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Universitas Pendidikan Indonesia pada tahun 2004. Penulis bergabung dengan Jurusan Teknik Elektro Universitas Trisakti pada tahun 2018 dan aktif menjadi asisten professor di bidang antena *microstrip*. Bidang penelitian yang ditekuni saat ini adalah antena *microstrip* dan telekomunikasi nirkabel.

Indra Surjati, lahir di Bangkok, Thailand. Meraih gelar Sarjana Teknik (Ir.) di bidang teknik elektro dan M.Eng (M.T) di bidang teknik telekomunikasi dari Program Pasca Sarjana Teknik Elektro Universitas Trisakti pada tahun 1996. Pada tahun 2004 ia menyelesaikan gelar Ph.D. di Jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia. Pada tahun 2011 dikukuhkan sebagai Guru Besar Jurusan Teknik Elektro di Trisakti. Minat penelitiannya meliputi antena *microstrip* dan sirkuit gelombang mikro untuk berbagai aplikasi sistem komunikasi.