

SISTEM ANTENA PEMANCAR MIMO (2×2) PATCH ELLIPTICAL PADA FREKUENSI 6 GHz UNTUK INDOOR BTS

MIMO ANTENNA TRANSMITTER SYSTEM 2×2 FOR INDOOR BTS 5G WITH ELLIPTICAL PATCH AT 6 GHz FREQUENCY

Kamaluddin Arif Sa'dan Putra¹, Rina Pudji Astuti², Agus Dwi Prasetyo³

^{1,2,3} Universitas Telkom, Bandung

¹Kamalludin@student.telkomuniversity.ac.id, ²rinapudjiastuti@telkomuniveristy.co.id,

³adprasetyo@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

5G adalah generasi terbaru dari teknologi komunikasi yang sedang dikembangkan di seluruh dunia termasuk Indonesia. Kelebihan 5G dari generasi sebelumnya yaitu memiliki latensi yang minim dan kecepatan yang tinggi. Frekuensi sub-6 GHz yang tergolong frekuensi yang mencakup banyak *bands* dari 5G. Penggunaan frekuensi 6 GHz pada simulasi ini membutuhkan antenna mikrostrip dengan susunan sistem MIMO agar mampu meningkatkan kapasitas kanal yang bekerja dan bandwidth yang lebar.

Pada penelitian ini dilakukan perancangan antenna mikrostrip dengan sistem MIMO susunan 2×2 empat elemen. Patch yang akan digunakan berbentuk elliptical dengan bahan Duroid 5880 yang memiliki ketebalan 1,575 mm dengan nilai dielektrik 2,2. Kelebihan Duroid 5880 mampu bekerja lebih stabil pada frekuensi yang tinggi sehingga dapat menghasilkan nilai parameter terbaik. Parameter yang dianalisis adalah pola radiasi, polarisasi, gain, mutual coupling, return loss dan koefisien korelasi serta bandwidth. Pengaruh lebar pemotong patch dan sudut kemiringan juga akan diteliti.

Berdasarkan hasil simulasi pada antenna MIMO 2×2 memiliki hasil gain maksimal sebesar 10,943 dBic. Kemudian polarisasi yang didapat adalah *circular* dengan bandwidth sebesar 391 – 394 MHz (5,845-6,242 GHz). Serta *mutual coupling* terbesar adalah -27,346 dB. Nilai ECC dan return loss terbesar adalah $1,1048 \times 10^{-4}$ dan -17,329 dB.

Kata Kunci: 5G, antenna, MIMO, Mikrostrip.

Abstract

5G is the latest generation of communication technology that is being developed around the world including Indonesia. The advantage of 5G over the previous generation is that it has minimal latency and high speed. The sub-6 GHz frequency is classified as a frequency that covers many of the bands of 5G. The use of 6 GHz frequency in this simulation requires a microstrip antenna with a MIMO system in order to increase the working channel capacity and wide bandwidth. In this study, the design of a microstrip antenna with a MIMO system of 2x2 elements of empathy was carried out. The patch to be used is in the form of an ellipse with Duroid 5880 material which has a thickness of 1.575 mm with a dielectric value of 2.2. The advantage of Duroid 5880 is that it is able to work more stable at high frequencies so that it can produce the best parameter values. Parameters analyzed are radiation pattern, polarization, gain, mutual coupling, return loss and correlation coefficient and bandwidth. The effect of cutter width and angle of inclination will also be investigated. Results Based on the simulation on the 2×2 MIMO antenna, the maximum gain is 10,943 dBic. Then the obtained polarization is circular with a bandwidth of 391 – 394 MHz (5,845-6,242 GHz). And the largest mutual coupling is -27,346 dB. The largest ECC values and return loss are 1.1048×10^{-4} and -17.329 dB.

Keywords: 5G, antenna, MIMO, Microstrip.

1. Pendahuluan

Pada era moderen abad 20 sebagian besar bidang kehidupan memerlukan peranan teknologi. Salah satu bidang teknologi yang memiliki peranan besar adalah layanan telekomunikasi. Kemajuan bidang telekomunikasi di Indonesia yang setiap tahun memiliki pembaruan untuk performa yang lebih baik dari generasi sebelumnya. Pentingnya pertukaran informasi perlu dibantu dengan layanan telekomunikasi yang *proper*. 5G merupakan generasi terbaru yang banyak akan pengembangannya dari berbagai negara, termasuk Indonesia yang akan gencar mengembangkan dan memperluas 5G dengan kondisi Indonesia pada akhir tahun 2021. Frekuensi sub-6 GHz yang tergolong frekuensi yang mencakup banyak *bands* dari 5G[1]. Pada spektrum 5G rentang 2-6 GHz tergolong frekuensi medium yang memiliki jangkauan luas untuk kebutuhan komunikasi 5G[2]. Performa gelombang elektromagnetik pada pita sub-6 GHz sangat baik terhadap halangan benda maupun atmosfer dan *obstacles* lainnya sehingga penyedia operator dan team reasearch akan cenderung menggunakan pita frekuensi tersebut. Oleh sebab itu pada penelitian ini frekuensi yang akan digunakan adalah 6 GHz dikarenakan menjadi salah satu kandidat untuk frekuensi kerja 5G.

Antena merupakan perangkat yang sangat penting di dalam bidang telekomunikasi. Memiliki fungsi sebagai *converter* sinyal dengan cara mengubah sinyal elektromagnetik menjadi sinyal radio. Fungsi antena yang lain adalah sebagai perantara untuk perpindahan gelombang elektromagnetik dengan alat transmisi menjadi struktur transisinya. Salah satu jenis antena yang memiliki fungsi dan kinerja yang selaras dengan spesifikisasi untuk 5G adalah *Multiple input multiple output* (MIMO) karena mampu mengirimkan data dengan kapasitas yang besar dengan kecepatan pertukaran data yang tinggi dan juga memiliki segi keunggulan dari bentuk dan berat. Yaitu lebih kompak dan ringan serta fabrikasi lebih mudah[3].

Pada tugas akhir ini dilakukan simulasi perancangan sistem antena pemancar MIMO 2×2 yang berkerja pada frekuensi 6 GHz tersusun dari 4 elemen 2 baris dan 2 kolom. Pada penelitian yang dilakukan oleh Nazia Tasnim terdapat perbandingan desain antena *patch elliptical* dengan catuan *feedline* dan *coaxial* yang didapat gain lebih besar dari penggunaan catuan feedline yaitu 10,58 dBic dan lebar bandwidth 489 MHz sedangkan untuk catuan coaxial 9,15 dBic dan 396,2 MHz[4]. Oleh sebab itu bentuk *patch* dan jenis catuan yang akan digunakan pada tugas akhir ini adalah *elliptical* dengan *feedline* yang mampu menghasilkan nilai gain yang tinggi dan bandwidth yang lebar. Bahan substat yang akan digunakan adalah duroid 5880 karena dapat memiliki nilai permitivitas yang rendah serta mampu bekerja lebih stabil pada frekuensi yang tinggi[5].

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, antena MIMO 2×2 dengan *patch elliptical* dapat menghasilkan *gain* maksimal sebesar 10,943 dBic dan *gain* terkecil 10,781 dBic. Sistem prototipe antena menghasilkan bandwidth sebesar 391-394 MHz (5,845-6,242 GHz). nilai mutual coupling yang dihasilkan adalah -27,352 dB untuk yang terbesar sedangkan -36,017 dB untuk yang terkecil dengan hasil koefisien korelasi terbesar adalah 1,1048 ×10⁻⁴ dan return loss -17,329 dB.

2. Dasar Teori

2.1 Teknologi 5G

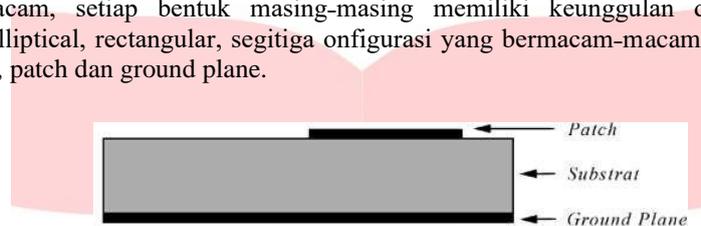
Teknologi 5G masih dalam pengembangan dari segi jaringan, transmisi dan infrastruktur. Di Indonesia pertama kali pengembangan pada tahun 2015 untuk mendukung program *industry* pemerintah yaitu 4.0 dan untuk memenuhi kebutuhan pengguna mobile phone yang terus meningkat seiring berjalannya waktu [8]. Selain itu tujuan dari generasi ke-lima yang lain adalah meningkatkan sistem telekomunikasi lebih reliable di zaman ini seperti kebutuhan Enhanced Mobile BroadBand (eMBB), Ultra Reliable and Low Latency Communications (uRLLC) dan machine-to-Machine Type Communications (mMTC). Ketentuan persyaratan minimal generasi lima (5G) menurut ITU-R adalah sebagai tabel berikut

Tabel 1. Spesifikasi Minimum 5G[4]

No	Parameter	Value		
		Downlink	Uplink	
1.	Peak Data Rate	20 Gbit/s	10 Gbit/s	
2.	Peak Spectral Efficiency	30 bit/s/Hz	15 bit/s/Hz	
3.	User Experienced Data Rate	100 Mbit/s	50 Mbit/s	
4.	5 th Percentile User Spectral Efficiency	Indoor Hotspot-eMBB	0.3 bit/s/Hz	0.21 bit/s/Hz
5.		Dense Urban-eMBB	0.225 bit/s/Hz	0.15 bit/s/Hz
6.		Rural-eMBB	0.12 bit/s/Hz	0.045 bit/s/Hz
7.	Connection Density	1.000.000 per km ²		
8.	Bandwidth	At least 100 MHz		

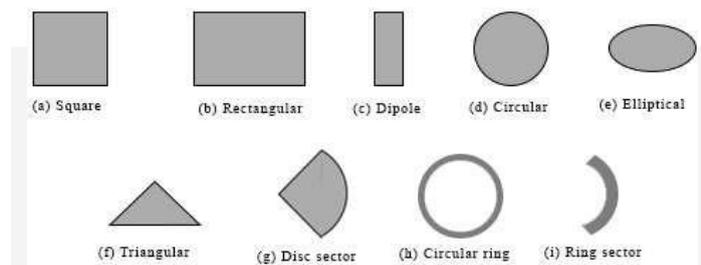
2.2 Antena Mikrostrip

2.3 Antena mikrostrip memiliki struktur yang terbuat dari tambalan logam yang di pasang di substrat dan terdiri berbagai k Pada umumnya bentuk patch pada antena mikrostrip memiliki berbagai design yang bermacam-macam, setiap bentuk masing-masing memiliki keunggulan dan kekurangan contoh diantaranya elliptical, rectangular, segitiga onfigurasi yang bermacam-macam. Terdiri dari tiga bagian yaitu substats, patch dan ground plane.



Gambar 1. Lapisan Antena Mikrostrip[5]

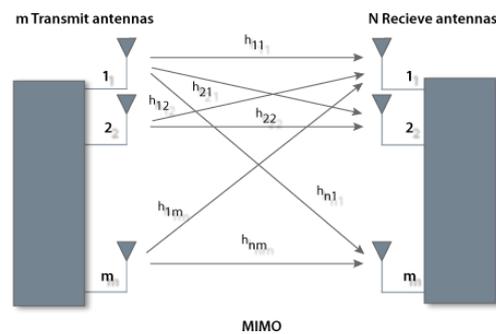
Bentuk *patch* antena terdiri dari persegi, persegi panjang, strip tipis (*dipole*), melingkar, *elips*, segitiga, sirkular atau konfigurasi lainnya seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. Bentuk Patch Antena[5]

2.4 MIMO

MIMO adalah sistem atau konsep pada jenis antena yang memiliki lebih dari satu antena di pengirim ataupun di penerima, dengan kata lain mampu mengirimkan informasi data secara simultan dengan tetap menggunakan satu kanal radio. Tujuannya dari antena sistem MIMO adalah memiliki kelebihan yang salah satunya parameter gain memiliki nilai tinggi dan juga multiplexing dengan hasil yang baik. Konsep MIMO pertama kali digunakan pada sistem komunikasi bergerak yaitu komunikasi seluler terutama dimulai saat 4G. Dengan penggunaan MIMO tersebut membantu mengurangi gangguan multithipath fading, yaitu ketika sinyal melewati lintasan yang berbeda-beda dan mengalami blocking oleh kendala yang dilalui ataupun refleksi pantulan sinyal [6].



Gambar 3. Arsitektur MIMO

2.5 Gain

Salah satu parameter yang dapat mempengaruhi baik tidaknya suatu performa antenna adalah gain. Gain merupakan perbandingan antara dua intensitas radiasi antenna yaitu antenna referensi dengan antenna pokok dengan daya masuk yang sama dari arah tertentu [7]. Dengan kata lain gain sebagai tolak ukur efisien suatu antenna pada saat memancarkan gelombang elektromagnetik.

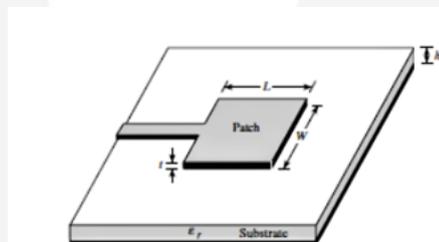
2.6 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

VSWR merupakan perbandingan antara amplitudo gelombang berdiri minimum dengan gelombang berdiri maksimum. VSWR dapat diperoleh dengan mengukur tegangan di sepanjang kanal transmisi menuju ke antenna. Nilai minimum dari VSWR adalah $1 - \infty$, semakin kecil nilai VSWR di suatu sistem maka keselarasan antara kanal transmisi dengan daya pemancar antenna semakin baik. Nilai ideal VSWR adalah 1, tetapi pada realisasinya kondisi tersebut sulit didapatkan. $VSWR \leq 1,5$ adalah nilai yang di toleransi.

2.7 Bandwidth

Bandwidth suatu antenna didefinisikan sebagai lebar pita atau rentang frekuensi dimana kinerja antenna yang berhubungan dengan beberapa karakteristik (seperti impedansi masukan, pola radiasi, *gain*, efisiensi, VSWR, *return loss*, *axial ratio*) memenuhi spesifikasi standar. Pada penelitian ini pembuatan antenna yang dilakukan dari rentang frekuensi sub- 6 GHz. Secara umum, kriteria *bandwidth* antenna adalah besarnya perubahan impedansi antenna tersebut terhadap perubahan frekuensi kerja dari frekuensi tengahnya. Perubahan impedansi antenna umumnya ditunjukkan oleh perubahan nilai VSWR maupun *return loss*. Jadi, *bandwidth* antenna adalah lebar bidang frekuensi untuk VSWR atau *return loss* dibawah suatu nilai tertentu

2.8 Teknik pencatuan



Gambar 4 Jenis Pencatuan Mikrostrip Line

Metode pencatuan adalah teknik untuk menyalurkan gelombang elektromagnetik ke antenna microstrip. Pada umumnya metode pencatuan yang digunakan ada dua yaitu pencatuan secara langsung (direct coupling) dan secara tidak langsung (electromagnetic coupling). Yang dimaksud dengan direct coupling adalah ketika power RF di catukan langsung patch menggunakan elemen penghubung di antenna. Sedangkan jenis pencatuan electromagnetic coupling perbedaannya adalah tidak memiliki penghubung antara peradiasi dan saluran transmisi.

3. Perancangan

3.1 Desain dan Spesifikasi Antena

Pada penelitian ini merancang sistem pemancar antenna MIMO 2×2 4 elemen dengan spesifikasi minimum yang harus dicapai sebagai berikut

Tabel 2. Spesifikasi Perancangan

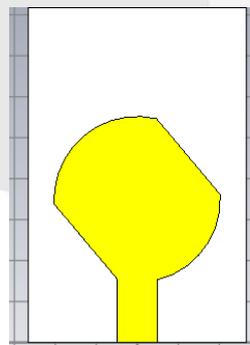
PARAMETER	NILAI
Frekuensi Kerja	6 GHz
<i>Bandwidth</i>	≥ 100 MHz
VSWR	≤ 2
<i>Gain</i>	$\geq 10,5$ dBic
<i>Mutual Copling</i>	≤ -20 dB
Pola Radiasi	Unidireksional
Polarisasi	Cicular
Return loss	≤ -10
Koefisien korelasi	0,5

Pada tugas akhir ini penulis akan merancang antenna MIMO di sisi pemancar dengan susunan 2×2 berjumlah 4 elemen. Bentuk *patch* yang digunakan adalah *elliptical* dan menggunakan pencatuan mikrostrip *feedline*. Bagian *feedline* dan lapisan *ground plane* menggunakan bahan tembaga (*copper*) yang mempunyai ketebalan 0,035 mm. Penentuan dimensi antenna menggunakan rumus yang tertera menghasilkan dimensi antenna sebagai berikut.

Tabel 3. Dimensi Antena Tunggal *Patch* Elliptical

Variabel	Ukuran Dimensi	Deskripsi
t	0,035	Tebal Konduktor
h	1,575 mm	Tebal Dielektrik
Wg	34,06 mm	Lebar <i>Groundplane</i>
Wf	4,8mm	Lebar <i>feed</i>
Lf	7,34mm	Panjang <i>feed</i>
Lg	40,85mm	Panjang <i>Groundplane</i>
r	10,8 mm	Jari-Jari <i>Patch</i>
sudut	69°	Sudut pemotong

Pemilihan substrat pada antenna mikrostrip berdasarkan rendahnya konstanta dielektrika yang dimiliki bahan. Bahan substrat antenna memiliki rentang dari $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Pada tugas akhir ini akan menggunakan bahan duroid 5880 yang memiliki tebal 1,57mm dan konstanta dielektrika yang kecil yaitu 2,2 sehingga akan lebih stabil jika digunakan pada frekuensi tinggi. Duroid 5880 mampu memiliki peformasi yang lebih efisien serta *bandwidth* yang lebar.



(a)



(b)

Gambar 5. Antena Tunggal patch elliptical. (a) sisi depan (b) sisi samping

4. Analisis Hasil Simulasi

4.1 Analisis Antena Tunggal

Tabel 4. pengaruh tebal pemotong terhadap gain dan Axial ratio

No.	Lebar pemotong (mm)	Axial Ratio (dB)	Gain (dBic)
1.	0,8	12,6	9,843
2.	1	6,5	10,226
3.	1,3	2,96	10,590
4.	1,5	4,6	10,428

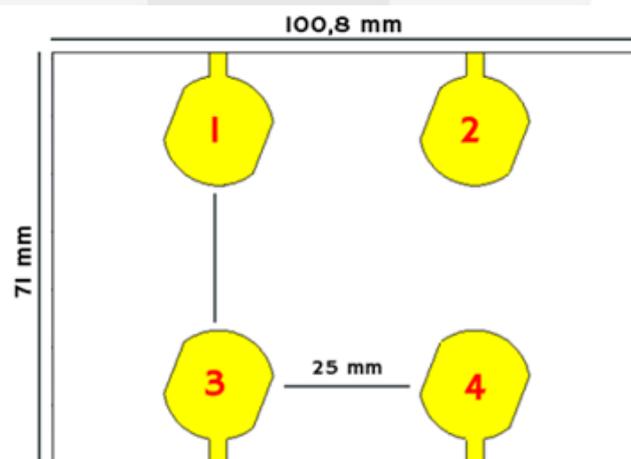
Dengan percobaan pertama lebar pemotong pada ukuran 0,8 mm nilai AR masih jauh dari target spesifikasi yaitu 12,6 dB dengan nilai gain sebesar 9,843 dBic. Penulis akan mencoba nilai secara *random* dengan nilai dari kecil ke besar. Pada saat lebar pemotong di tambah menjadi 1 mm. Pada tabel di atas menunjukkan nilai AR lebih kecil dari pada percobaan sebelumnya. Ketika lebar pemotong ditambah menjadi 1 mm maka nilai AR menjadi 6,52 dB dan besar gain adalah 10,226 dB. Selanjutnya lebar pemotong dinaikan menjadi 1,5 mm. Grafik diatas menunjukkan hasil AR pada saat tinggi ditambah 0,5 mm dari 1 mm menjadi 1,5mm. Nilai AR yang didapat adalah 4,6 dB dengan selisih 1,9 dB dan gain yang didapat sebesar 10,428 dBic masih kurang dari spesifikasi yang ditentukan. Selanjutnya penulis akan melakukan pengurangan 0,2 mm. Pada percobaan keempat hasil simulasi memiliki nilai yang baik jika dibandingkan dengan percobaan ketiga. Setelah melakukan percobaan keempat maka nilai terbaik yang didapat pada ketebalan 1,3mm dengan nilai AR 2,96 dB dan nilai gain sebesar 10,590 dBic bekerja pada frekuensi 6,015 GHz.

Tabel 5. Pengaruh sudut pemotong terhadap S-parameter

No.	Besar sudut (mm)	S-parameter at 6 GHz (dB)
1.	45°	-
1.	50°	-
2.	60°	-14,1
3.	69°	-20,8

Untuk simulasi pertama, penulis akan menggunakan 45° sebagai acuan pembanding. Maka hasil dari S-parameter adalah sebagai grafik berikut. Tabel diatas menunjukkan bahwa hasil simulasi pertama pada frekuensi 6 GHz memiliki nilai S-parameter sebesar -8 dB, untuk frekuensi tengahnya menimbulkan *dual band* yaitu di frekuensi 5,7 GHz dan 6,2 GHz. Pada percobaan kedua besar derajat akan dinaikan 5° dari acuan pertama menjadi 50°. Berikut grafik hasil dari simulasi kedua. Jika dilihat dari grafik 4.6 maka nilai S-parameter yang didapat adalah -8,3 dB dengan besar 50° dengan frekuensi tengah yang sama dengan percobaan pertama. Tetapi untuk kedalaman lembah cenderung ke sisi kiri yaitu di frekuensi 5,7 GHz. Pada percobaan ketiga besar derajat akan ditambah 15° dari pembanding pertama yaitu menjadi 60°. Hasil dari percobaan ketiga adalah sebagai berikut. Pada tabel 5 hasil dari sudut 60° pada pemotong menghasilkan S-parameter pada frekuensi 6 GHz menjadi -14,18 dB. Sedangkan untuk frekuensi tengah bergeser dari 5,7 GHz menjadi 5,84 GHz. Percobaan ketiga ini semakin mendekati target parameter yang sudah ditentukan. Oleh sebab itu penulis akan menambahkan 9° dari percobaan ketiga atau 19° jika dibandingkan dengan percobaan pertama. Percobaan keempat ini akan menggunakan 69°. Hasil simulasi adalah sebagai berikut. Grafik menunjukkan bahwa nilai yang didapat dengan sudut 69° memiliki nilai S-parameter sebesar -20,8 dB dengan frekuensi tengah 6 GHz. Oleh sebab itu pada tugas akhir ini sudut terbaik sebesar 69°.

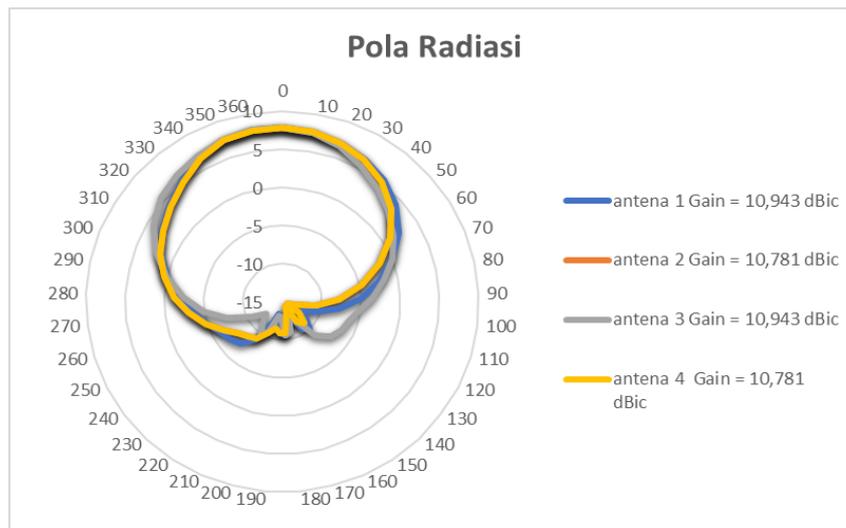
4.2 Analisis MIMO 2x2



Gambar 6. Desain MIMO 2x2 dengan patch elliptical

4.2.1 Pola Radiasi

Tabel 6. Daftar gambar pola radiasi dan gain antenna mimo 2x2

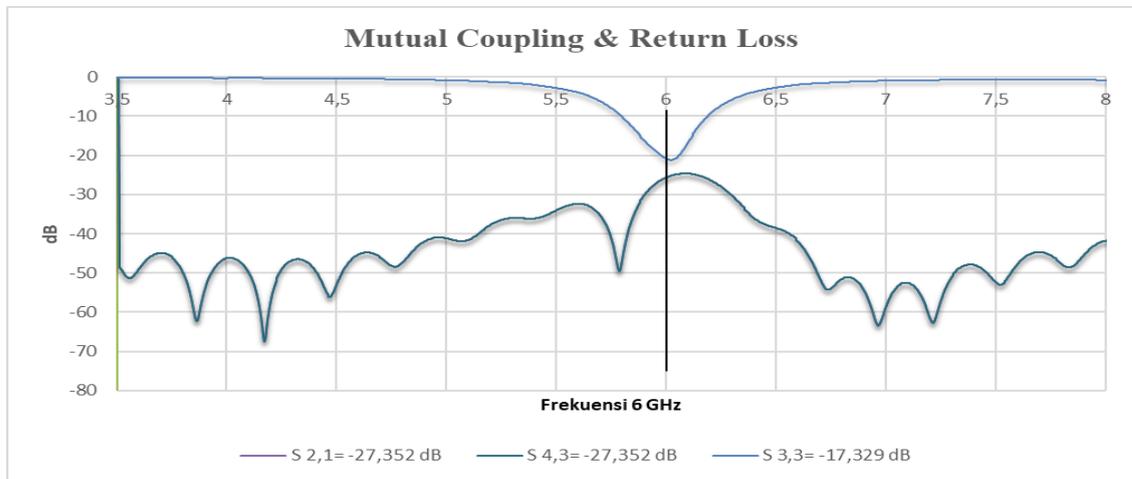


Jika dilihat dari hasil tabel di atas maka nilai gain dan bentuk polaradiasi antara *patch* 1 dan 3 maupun *patch* 2 dan 4 memiliki nilai gain yang sama. hal tersebut terjadi karena letak dari kedua *patch* yang sama. nilai gain nya mempengaruhi kinerja antenna yang lain. Letak dari *patch* satu yang berada di tepi kiri panjang antenna memiliki gain 10,943 dBic lebih besar 0,162 dBic dari *patch* dua dan empat yang memiliki nilai gain 10,781 dBic. Penggunaan bentuk *patch elliptical* pada antenna bersistem MIMO 2x2 sudah mampu mencapai target *gain* yang diinginkan, oleh sebab itu tidak perlu metode tambahan untuk Tugas Akhir ini.

4.2.1 Mutual Coupling

Mutual *coupling* adalah salah satu parameter penting pada antenna yang memiliki sistem MIMO. Pada antenna MIMO setiap elemen antenna akan mempengaruhi satu sama lain. Jika nilai dari mutual *coupling* terlalu besar maka dikerja antenna tidak maksimal. Pada Tugas Akhir ini nilai minimal yang diambil sebesar ≤ -20 dB. Berikut merupakan grafik mutual *coupling return loss* terbesar dari antenna MIMO 2x2

Gambar 7. Grafik hasil mutual coupling dan return loss

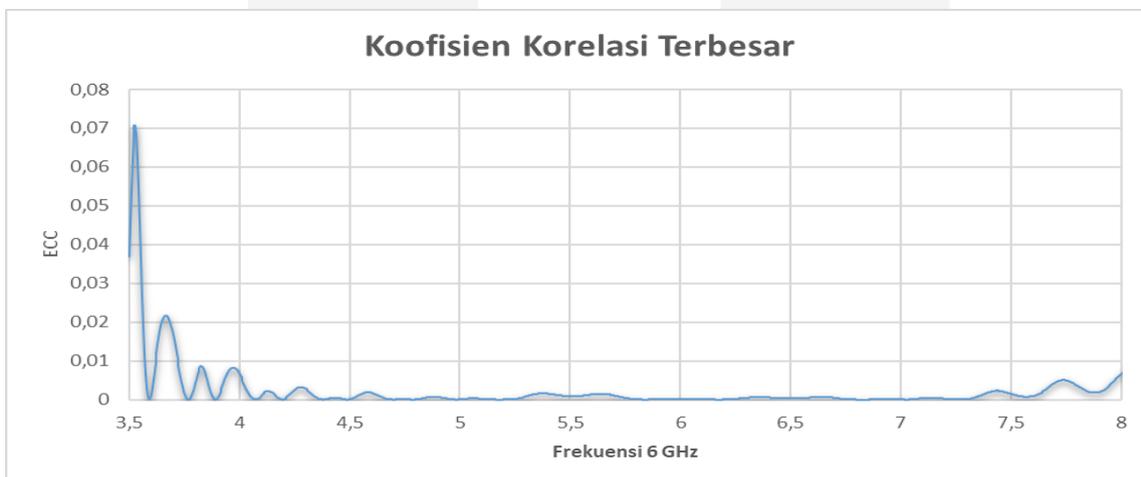


Penentuan jarak yang sudah dihitung dengan rumus $\lambda/2$ telah mendapatkan hasil 25 mm untuk jarak setiap elemennya. Pengaruh interferensi yang didapat sudah menghasilkan nilai yang baik. Karena hasil terbesar nilai Mutual *coupling* adalah -27,346 dB. sedangkan untuk return loss terbesar adalah -17,329 dB.

4.2.2 Koefisien Korelasi

Pada sub-bab ini akan menganalisis Koefisien korelasi pada antenna sistem MIMO 2×2 dengan melihat hasil dari simulasi dari tugas akhir ini. Nilai koefisien korelasi pada antenna MIMO harus tidak lebih dari 0,2 atau $< 0,2$.

Gambar 8. Grafik hasil Koefisien Korelasi



Karena untuk meminimalisir eror ketika terjadi proses transmisi antara dua antenna. Jika dilihat dari Gambar 8 grafik koefisien korelasi pada frekuensi 6 GHz. Hasil terbesar adalah $1,1048 \times 10^{-4}$. Nilai tersebut menunjukkan korelasi antar antenna baik dan dan peluang terjadinya eror saat transmisi sangat kecil. nilai rata-rata koefisien korelasi yang didapat adalah $2,447 \times 10^{-5}$.

5. Kesimpulan

Simulasi dan perancangan antenna sistem MIMO 2×2 dengan menggunakan patch elliptical yang telah dilakukan dan dianalisis telah mendapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi antenna MIMO 2×2 dengan patch elliptical pada tugas akhir ini sudah memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Oleh sebab itu antenna yang dirancang sesuai dengan kebutuhan 5G
2. Gain dan pola radiasi yang dihasilkan antenna MIMO 2×2 bercermin sama sehingga menghasilkan pola cermin antenna 1 dengan antenna 3 sedangkan antenna 2 dengan antenna 4.
3. Nilai mutual coupling yang dihasilkan memiliki nilai bagus yaitu dengan nilai maksimal -27,346 dB dan nilai minimal adalah -36,012 dB.
4. Patch elliptical cenderung memiliki gain yang tinggi. pada simulasi ini menghasilkan gain sebesar 10,943 dBic.
5. Besar sudut yang memiliki hasil terbaik pada perancangan ini yaitu 69° dan lebar pemotong patch 1,3 mm.
6. Antena MIMO 2x2 patch elliptical pada tugas akhir ini cocok untuk perangkat BTS indoor 5G karena memiliki struktur yang simple dan bentuk yang kompek serta sudah memiliki spesifikasi 5G.



REFERENSI

- [1] J. Molins-Benlliure, E. Antonino-Daviu, M. Cabedo-Fabres, and M. Ferrando-Bataller, "Four-Port Wide-Band Cavity-Backed Antenna with Isolating X-Shaped Block for Sub-6 GHz 5G Indoor Base Stations," *IEEE Access*, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3084852.
- [2] P. Waghmare, P. Gupta, K. Gehlod, A. Shakya, and L. Malviya, "2x2 Wideband Array MIMO Antenna for 5G Spectral Band," *2019 IEEE 5th Int. Conf. Conver. Technol. I2CT 2019*, pp. 5–8, 2019, doi: 10.1109/I2CT45611.2019.9033947.
- [3] F. W. Ardianto, N. M. A., and B. Syihabuddin, "Analisis Simulasi Antena MIMO 4 4 Susunan Persegi dan Sirkular pada Frekuensi 15 GHz," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 7, no. 2, pp. 174–182, 2018, doi: 10.22146/jnteti.v7i2.420.
- [4] ITU, "Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)," *Work. Party 5D*, vol. November, no. 5D/TEMP/300(Rev.1), pp. 1–148, 2017.
- [5] C. BALANIS, "ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN," 2016.
- [6] B. Halvarsson *et al.*, "Distributed MIMO demonstrated with 5G radio access prototype," *EUCNC 2016 - Eur. Conf. Networks Commun.*, pp. 302–306, 2016, doi: 10.1109/EuCNC.2016.7561052.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. 2012.
- [8] R. P. Wibowo, "Perancangan Dan Pembuatan Antena Array Dengan Beamwidth $\leq 5^\circ$ Pada Frekuensi S-Band Dengan Menggunakan Elemen Microstrip Bow-Tie," *Tugas Akhir, Fak. Teknol. Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Novemb.*, pp. 1–114, 2017.
- [9] A. Akbar, S. Alam, U. Trisakti, I. Surjati, U. Trisakti, and C. Polarization, "Perancangan Antena Mikrostrip Patch Circular (2,45 GHz) Array dengan Teknik Pencatu Proximity Sebagai Penguat Sinyal Wi-Fi," no. January 2018, 2017, doi: 10.36055/setrum.v6i2.2599.
- [10] K. Mahendran, K. Dhivya, and V. Prasanniya, "Microstrip Patch Antenna Enhancement Techniques: a Survey," *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol.*, vol. 04, no. 11, pp. 245–249, 2020, doi: 10.33564/ijeast.2020.v04i11.042.
- [11] A. D., "Analisa efisiensi antena dipole ditinjau dari penggunaan bahan reflektor," no. 2. pp. 47–51, 2011.

