

Perancangan Antena Mimo 8×8 Frekuensi Kerja 3,5 GHz Untuk Teknologi 5G

Nasrul^{1*}, Yustini², Uzma Septima³ dan Aprilia Nindika⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Padang

*Corresponding Author : nasrulnawi.065@gmail.com

Abstrak—Antena MIMO 8×8 dirancang dan disimulasikan menggunakan *software* CST Studio Suite 2019 yang menghasilkan visualisasi dengan menggunakan *software* MATLAB. Setelah dilakukan optimasi, pada pengukuran dan simulasi parameter *return loss* dengan frekuensi 3,5 GHz didapatkan hasil masing-masing sebesar -11,85 dB dan -31,57 dB. Selain itu, terdapat beberapa rentang frekuensi lain dengan nilai di bawah -10 dB, seperti antara 3,047 GHz hingga 3,243 GHz, 3,438 GHz hingga 3,925 GHz, dan 4,575 GHz hingga 5,095 GHz. Pengukuran VSWR adalah 1,668, sedangkan hasil simulasi menunjukkan nilai VSWR sebesar 1,054. Selain itu, hasil simulasi *mutual coupling* adalah -13,16, sedangkan pengukuran *mutual coupling* menunjukkan -28,53, dengan nilai ECC berturut-turut adalah 0,0005 dan 0,0002.

Kata kunci: Antena 8×8, Frekuensi 3,5 GHz, MIMO, Slot, Teknologi 5G.

Abstract—The 8×8 MIMO antenna is designed and simulated using CST Studio Suite 2019 software, which generates a visualization using MATLAB software. After optimization, the measurement and simulation of the return loss parameters at a frequency of 3,5 GHz yielded results of -11,85 dB and -31,57 dB respectively. In addition, there are several other frequency ranges with values below -10 dB, such as between 3,047 GHz and 3,243 GHz, 3,438 GHz and 3,925 GHz, and 4,575 GHz and 5,095 GHz. The measured VSWR is 1,668, while the simulation results show a VSWR value of 1,054. In addition, the Mutual Coupling simulation result is -13,16, while the Mutual Coupling measurement is -28,53, with ECC values of 0,0005 and 0,0002, respectively.

Keywords: 8×8 Antenna, 3,5 GHz frequency, MIMO, Slot, 5G Technology

© 2023 Elektron Jurnal Ilmiah

I. PENDAHULUAN

Antena adalah sebuah perangkat yang dapat memancarkan dan menerima gelombang radio [1]. Salah satu jenis antena adalah antena mikrostrip, yang mampu mengimplementasikan teknologi *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) [2]. Pada saat ini, teknologi pada antena yang sedang berkembang pesat adalah antena MIMO yang melibatkan penggunaan beberapa pemancar dan penerima untuk mengirim dan menerima sinyal. [3]. MIMO memancarkan 2 atau lebih aliran *radio frequency* pada ruang dan waktu yang sama [4].

Kecepatan transfer data dapat ditingkatkan dengan menggunakan *massive* MIMO. Penggunaan lebih banyak antena dalam jaringan akan membuat sistem lebih tahan terhadap gangguan *noise* dibandingkan dengan sistem yang hanya menggunakan 1 atau 2 antena [5]. Teknologi sistem telekomunikasi mengalami berbagai perubahan, dimulai dari perkembangan teknologi 1G, 2G, 3G, 4G, hingga pada saat ini berkembang teknologi 5G [6]. Teknologi 5G di Indonesia menjadi landasan utama dalam menghadapi kebutuhan teknologi *wireless* modern yang akan datang. Jaringan 5G dikenal memiliki performa lebih unggul dibandingkan dengan 4G [7]. Pada frekuensi sub 1 – 6 GHz memberikan layanan dengan cakupan dan kapasitas yang optimal, dengan frekuensi 3,5 GHz menjadi pilar utama layanan 5G.

Teknologi 5G membutuhkan *bandwidth* yang lebar untuk mengirim dan menerima kecepatan transfer data,

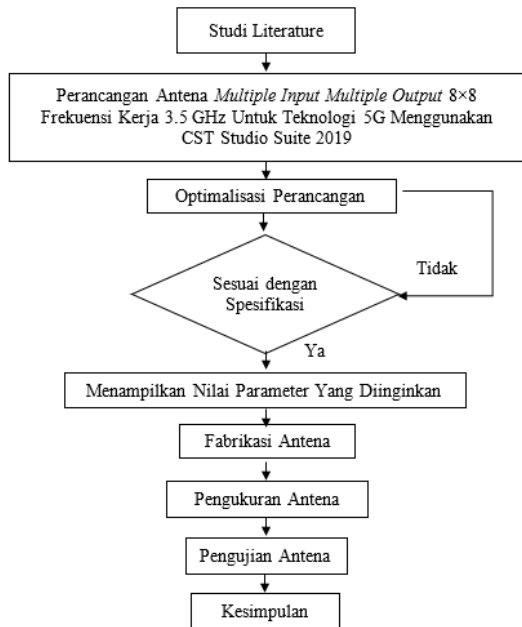
oleh karena itu dibutuhkan metode *slot* untuk meningkatkan *bandwidth* [8]. Beberapa penelitian yang dilakukan terkait antena MIMO 8×8 pada frekuensi 3,5 GHz untuk teknologi 5G, diantaranya adalah antena MIMO pada *smartphone* untuk operasi 8×8, menunjukkan bahwa ruang yang terbatas pada *smartphone* menyebabkan isolasi rendah, efisiensi, dan antena berkurang [9]. Selanjutnya mengidentifikasi bahwa *New Radio* (NR) dalam teknologi 5G memiliki frekuensi dari 3300 – 3800 MHz yang dianggap sebagai pita frekuensi dengan potensi harmonisasi global terbesar [10]. Penelitian berikutnya merancang antena MIMO array dengan 8 port dan frekuensi *ultrawideband* (UWB) dari 3,3 – 6 GHz dengan hasil parameter *return loss* < -11 dB, isolasi > 11 dB, ECC < 0,09, dan pola radiasi *omnidirectional* [11].

Oleh karena itu, perancangan ini bertujuan untuk merancang antena MIMO dengan frekuensi kerja 3,5 GHz untuk teknologi 5G, serta dapat mengukur parameter antena yang menggunakan *software* CST Studio Suite 2019 untuk merancang dan simulasi, dan MATLAB untuk memvisualisasikan hasil dari simulasi dan pengukuran

II. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Dalam penelitian ini tahapan pertama adalah studi literature untuk menemukan referensi yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Lalu, melakukan perancangan antena.

Kemudian, optimalisasi perancangan dengan studi parametrik yang bertujuan mengetahui hasil parameter antenna yang sesuai spesifikasi antenna dengan melakukan perubahan nilai dimensi antenna sehingga menemukan hasil yang optimal. Lalu, melakukan fabrikasi, pengukuran antenna, dan pengujian antenna.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

A. Perancangan Antena

Perancangan ini menggunakan teknik MIMO yang terdiri dari 8 antenna pemancar dan 8 antenna penerima yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz. Perancangan ini membandingkan hasil simulasi yang dirancang menggunakan CST Studio Suite 2019 dan pengukuran.

1. Perangkat yang Digunakan

Perangkat keras digunakan pada saat fabrikasi, pengukuran dan pengujian. Saat pengukuran menggunakan beberapa alat seperti VNA, Spectrum Analyzer, dan RF Generator.

2. Spesifikasi Antena

Langkah pertama sebelum melakukan perancangan antenna yaitu mengetahui spesifikasi antenna yang akan dirancang seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Antena

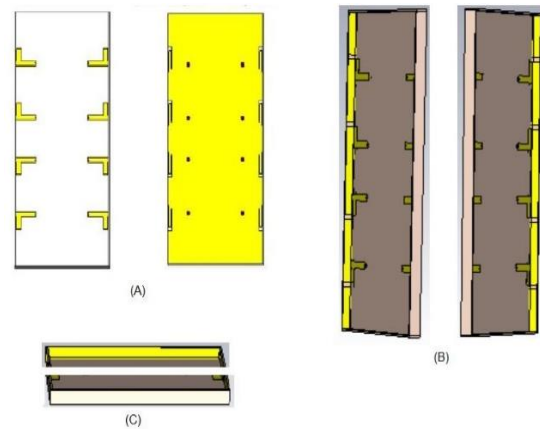
No	Parameter Antena	Nilai
1	Frekuensi Kerja	3.5 GHz
2	Return loss (S_{11})	< -10 dB
3	Pola Radiasi	Omnidirectional
4	ECC	< 0.5
5	Gain	> 2 dBi
6	VSWR	$1 \leq VSWR \leq 2$
7	Impedansi	50 Ω

Adapun spesifikasi untuk substrate FR-4 Epoxy yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Substrate

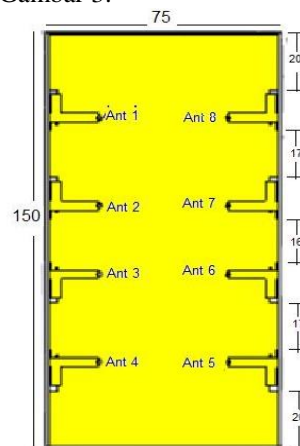
No	Spesifikasi Substrate	Nilai
1	Relative Permittivity	4.4
2	Loss Tangent	0.025
3	Ketebalan Substrate	0.8 mm

Dapat dilihat pada Gambar 2 merupakan tampilan antenna tampak depan yang terdiri dari 8 antenna, tampak belakang yang terdiri dari 8 port dan 8 slot U, 2 bingkai panjang yang terdiri dari 4 stub antenna pada tampak samping kiri kanan dan 2 bingkai pendek pada tampak atas dan bawah



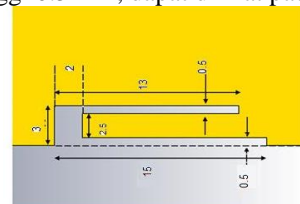
Gambar 2. Tampilan Antena (A) Tampak Depan Belakang, (B) Tampak Kiri Kanan, (C) Tampak Atas Bawah

Setelah itu, mengetahui penjelasan struktur antenna Multiple Input Multiple Output 8x8. Antena memiliki bentuk bingkai kotak terbuka dengan slot yang berukuran 150 mm x 75 mm. Desain ini terdapat 4 bingkai pada sisi tepi yaitu 2 bingkai panjang (kanan dan kiri), dan 2 bingkai pendek (atas dan bawah) yang disusun secara tegak lurus terhadap PCB sedangkan untuk 8 antenna ditempatkan pada substrate PCB. Dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Geometri Antenna

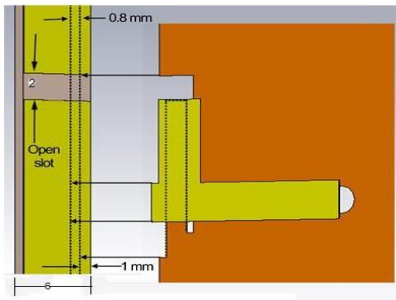
Antena ini juga memiliki slot berbentuk U pada groundplane dengan ukuran panjang 15 mm, lebar 13 mm, dan tinggi 0.5 mm, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Detail Struktur Slot U

Selain itu, terdapat slot terbuka pada sisi tepi bingkai panjang (kanan dan kiri) antenna dengan ukuran

lebar 2 mm. Dimana, slot terbuka ini terhubung dengan slot U dan stub antenna, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Detail Struktur Slot Terbuka

3. Perancangan Menggunakan Software CST Studio Suite 2019

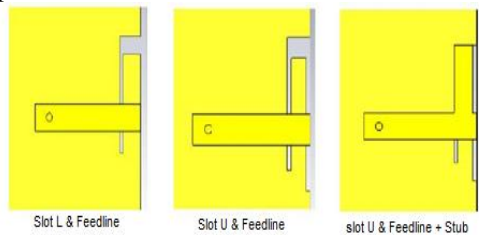
Perancangan antena MIMO 8x8 menggunakan teknik pencatutan coaxial feeding, dimana teknik pemasangan port dilakukan pada konduktor bagian luar yang terhubung dengan ground plane antena. Antena MIMO 8x8 frekuensi kerja 3.5 GHz untuk teknologi 5G dirancang menggunakan software CST Studio Suite 2019 dilakukan dengan langkah – langkah sebagai berikut:

a. Masukkan nilai dimensi antena sebelum optimasi yang ingin dirancang pada software CST studio suite 2019.

Tabel 3. Dimensi Antena Sebelum Optimasi

No	Simbol	Deskripsi	Nilai
1	wsp2	Tinggi Slot Belakang	3
2	wsp	Lebar Slot Belakang	0.5
3	wp	Lebar Stub Antena	2.5
4	wfd	Lebar Feedline Antena	3
5	W	Lebar Substrate	75
6	v	Lebar Slot Tepi	2.1
7	t	Tinggi Tepi PCB	6
8	teflon	Diameter Teflon	2.27
9	slt	Ukuran Slot Belakang	2
10	s3	Jarak dari ant2,3,6,7	16
11	s2	Jarak dari ant1,2,7,8	17
12	s1	Jarak dari Ujung ant1,8,4,5	20
13	pin	Diameter Port	0.45
14	p	Ketebalan Copper	0.035
15	lsp3	Panjang Slot Belakang	13
16	lsp2	Panjang Slot Tepi	2
17	lsp	Panjang Slot Belakang	15
18	lp	Panjang Stub Belakang	7.5
19	lfd	Panjang Stub Antena	15
20	L	Panjang Feedline Antena	150
21	h	Ketebalan Substrate	0.8

b. mendesain antena sesuai dengan parameter yang telah dibuat serta pemberian port pada antena. Visualisasi hasil rancangan antena dapat dilihat pada Gambar 6.



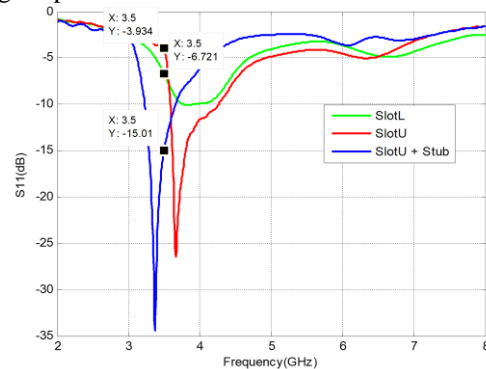
Gambar 6. Tampilan Rancangan Antena MIMO 8x8

4. Studi Parametrik

Pada tahap ini akan dilakukan perubahan nilai pada beberapa parameter antena sehingga menemukan hasil yang optimal.

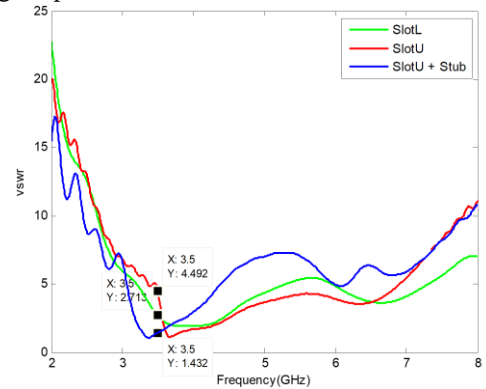
a. Mendesain Antena Sebelum Optimasi

Pada tahap ini akan dilakukan desain dengan 3 percobaan pada frekuensi 3,5 GHz, yang mana percobaan1 akan mendesain antena dengan bentuk slot L dengan feedline, percobaan2 akan mendesain antena dengan bentuk slot U dengan feedline, dan percobaan3 akan mendesain antena dengan bentuk slot U dengan feedline yang ditambahkan dengan stub. Dapat dilihat pada Gambar 7 untuk melihat hasil return loss yang mana didapatkan hasil return loss untuk slot L yaitu -6,721 dB, slot U yaitu -3,934 dB, dan stub yaitu -15,01 dB. Dimana, pada desain slot U dengan feedline yang ditambahkan stub didapatkan hasil optimal yang sesuai dengan spesifikasi antena.



Gambar 7. Return Loss Sebelum Optimasi

Dapat dilihat pada Gambar 8 untuk melihat hasil VSWR yang mana didapatkan hasil VSWR untuk slot L yaitu 2,713, slot U yaitu 4,492, dan stub yaitu 1,432. Dimana, pada desain slot U dengan feedline yang ditambahkan stub didapatkan hasil optimal yang sesuai dengan spesifikasi antena.

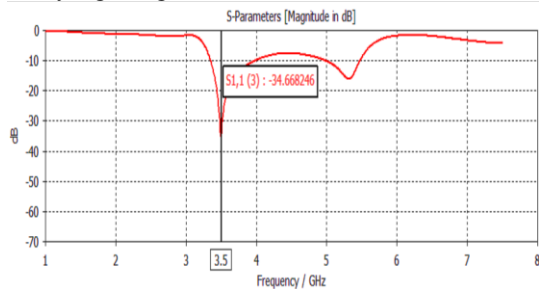


Gambar 8. VSWR sebelum optimasi

b. Mendesain Antena Setelah Optimasi

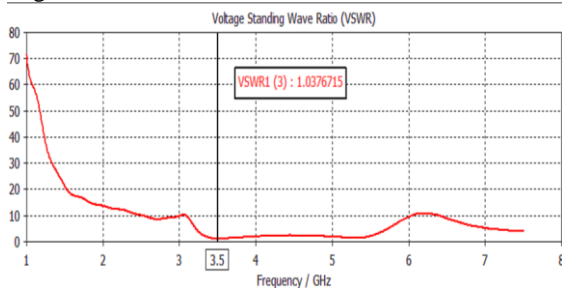
Pada tahap ini melanjutkan desain slot U dan feedline yang ditambahkan dengan stub menjadi 8 buah slot U dan 8 buah feedline dan stub. Selanjutnya akan dilakukan simulasi dan optimasi menggunakan parameter sweep pada feedline dari 15 mm – 15,2 mm dan stub dari 3,5 mm – 3,7 mm dengan frekuensi kerja

3,5 GHz Didapatkan ukuran yang optimal untuk *feedline* 15,1 mm dan *stub* antenna 3,7 mm. Sehingga, nilai *return loss* didapatkan sebesar -34,66 dB. Dapat dilihat pada Gambar 9 nilai *return loss* setelah dioptimasi sudah mendapatkan nilai sesuai spesifikasi antenna yang diinginkan.



Gambar 9. Return loss Setelah Parameter Sweep

Didapatkan nilai VSWR sebesar 1,037. Dapat dilihat pada Gambar 10 nilai VSWR setelah dioptimasi sudah mendapatkan nilai sesuai spesifikasi antenna yang diinginkan.



Gambar 10. Gambar 9. VSWR Setelah Parameter Sweep

Setelah dilakukan studi parametrik, maka didapatkan hasil dimensi antenna pada tabel 3 setelah optimasi yang akan digunakan saat fabrikasi.

Tabel 4. Dimensi Antena Setelah Optimasi

No	Symbol	Deskripsi	Nilai
1	wsp2	Tinggi Slot Belakang	3
2	wsp	Lebar Slot Belakang	0.5
3	wp	Lebar Stub Antena	3.7
4	wfd	Lebar Feedline Antena	3.2
5	W	Lebar Substrate	75
6	v	Lebar Slot Tepi	2.1
7	t	Tinggi Tepi PCB	6
8	teflon	Diameter Teflon	2.27
			2
9	slt	Ukuran Slot Belakang	2
10	s3	Jarak dari ant2,3,6,7	16
11	s2	Jarak dari ant1,2,7,8	17
12	s1	Jarak dari Ujung ant1,8,4,5	20
13	pin	Diameter Port	0.45
14	p	Ketebalan Copper	0.035
15	lsp3	Panjang Slot Belakang	13
16	lsp2	Panjang Slot Tepi	2
17	lsp	Panjang Slot Belakang	15
18	lp	Panjang Stub Belakang	6.9
19	lfd	Panjang Stub Antena	15.1
20	L	Panjang Feedline Antena	150
21	h	Ketebalan Substrate	0.8

B. Fabrikasi Antena

Setelah dilakukan perancangan, simulasi dan optimasi sesuai hasil yang diinginkan. Dimana, fabrikasi antenna mempunyai langkah – langkah sebagai berikut, pemotongan PCB menjadi 2 bagian yaitu

bagian depan dan bagian tepi (kanan, kiri, dan atas, bawah). Setelah itu, dilakukan pencetakan ke PCB dan dilarutkan menggunakan larutan PCB. Langkah berikutnya adalah melakukan penyetulan PCB untuk pemasangan port female. Setelah itu, menyusun semua potongan PCB menjadi bentuk bingkai kotak dan memasang port pada posisinya. Maka hasil fabrikasi antenna dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Fabrikasi Antena MIMO 8x8

III. HASIL DAN ANALISA

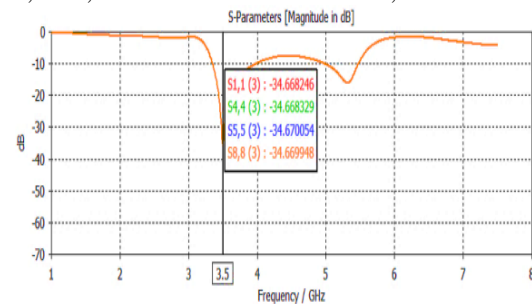
Pada tahap ini membahas mengenai perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran serta hasil pengujian antenna MIMO 8x8 frekuensi kerja 3,5 GHz untuk teknologi 5G.

A. Hasil Simulasi Parameter Antena MIMO 8x8

Dalam penyusunan antenna MIMO 8x8, digunakan struktur *centrosymmetric* yang menghasilkan antenna menjadi 2 bagian yaitu ant1, ant4, ant5, dan ant8 dikategorikan menjadi bagian 1, dan ant2, ant3, ant6, dan ant7 dikategorikan menjadi bagian 2. Dengan demikian, diperoleh hasil parameter seperti *return loss*, *bandwidth*, *VSWR*, *mutual coupling* dan isolasi, pola radiasi dan gain.

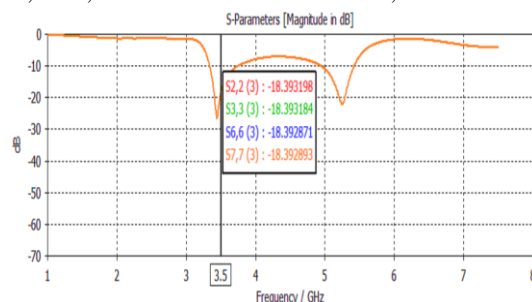
1. Return Loss

Pada Gambar 12, terlihat hasil *return loss*1 pada ant1, ant4, ant5, dan ant8 memiliki nilai -35,66 dB



Gambar 12. Return Loss 1 Hasil Simulasi

Pada Gambar 13, terlihat hasil *return loss*2 pada ant2, ant3, ant6, dan ant7 memiliki nilai -18,39 dB.



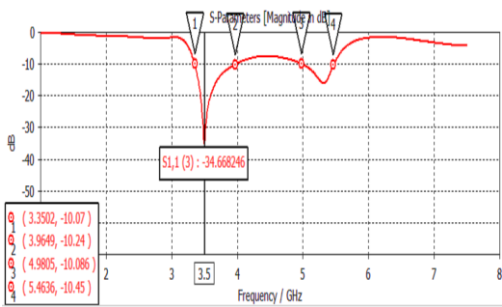
Gambar 13. Return Loss 2 Hasil Simulasi

2. Bandwidth

Dapat dilihat pada Gambar 14 terlihat hasil bandwidth 1 didapatkan sebesar 614,7 MHz, sedangkan bandwidth 2 didapatkan sebesar 483,1 MHz. Dimana, untuk mendapatkan hasil bandwidth menggunakan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 BW1 &= f_{U(marker1)} - f_{L(marker2)} \\
 &= 3964.9 \text{ MHz} - 3350.2 \text{ MHz} \\
 &= 614.7 \text{ MHz} \\
 &= 0.6147 \text{ GHz}
 \end{aligned}$$

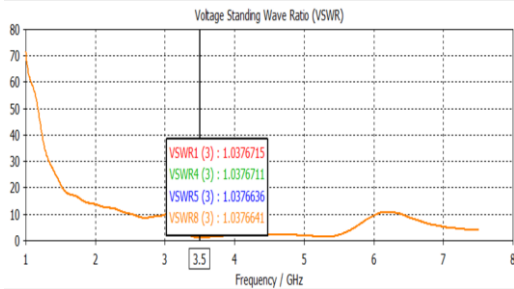
$$\begin{aligned}
 BW2 &= f_{U(marker3)} - f_{L(marker4)} \\
 &= 5463.6 \text{ MHz} - 4980.5 \text{ MHz} \\
 &= 483.1 \text{ MHz} \\
 &= 0.4831 \text{ GHz}
 \end{aligned}$$



Gambar 14. Bandwidth Hasil Simulasi

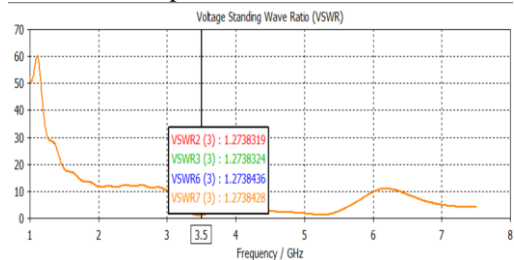
3. VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

Gambar 15, terlihat hasil simulasi VSWR1 pada ant1, ant4, ant5, dan ant8 didapatkan sebesar 1,03.



Gambar 15. VSWR 1 Hasil Simulasi

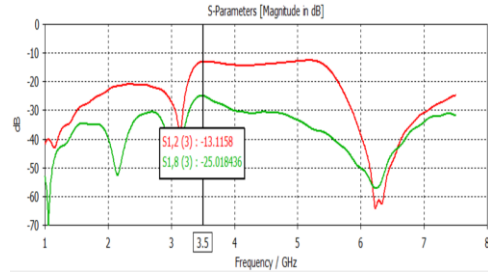
Gambar 16, terlihat hasil VSWR2 pada ant2, ant3, ant6, dan ant7 didapatkan sebesar 1,27.



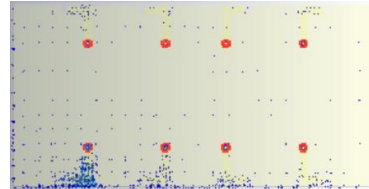
Gambar 16. VSWR 2 Hasil Simulasi

4. Mutual Coupling dan Distribusi Arus

Hasil simulasi S12, dilihat pengaruh antenna 1 terhadap antenna 2 didapatkan hasil isolasi nya tidak optimal dikarenakan nilai *mutual coupling* yaitu -13,11 dB. Sedangkan, hasil simulasi S18, dilihat pengaruh antenna 1 terhadap antenna 8 didapatkan hasil isolasi nya optimal dikarenakan nilai *mutual coupling* yaitu -25,01 dB. Dapat dilihat Gambar 17 untuk melihat hasil *mutual coupling*.



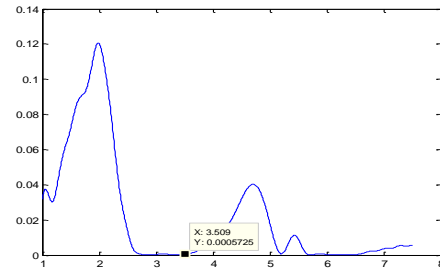
Gambar 17. Mutual Coupling Hasil Simulasi
Dapat dilihat Gambar 18 untuk melihat hasil distribusi arus.



Gambar 18. Distribusi Arus Hasil Simulasi

5. Envelope Correlation Coefficient (ECC)

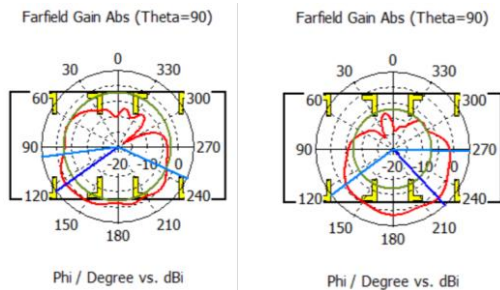
Nilai ECC pada frekuensi 3.5 GHz didapatkan hasil simulasi mendekati nilai 0, yang mana nilai ECC hasil simulasi adalah 0.0005, semakin rendah nilai ECC korelasi antara antenna berkurang, dapat dilihat pada gambar 19.



Gambar 19. ECC Hasil Simulasi

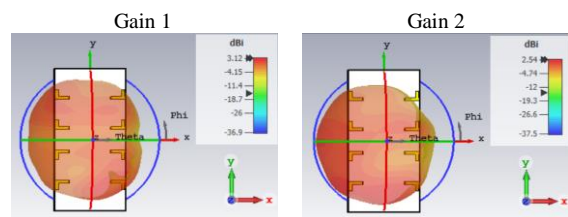
6. Pola Radiasi dan Gain

Gambar 20, terlihat hasil simulasi pola radiasi berbentuk *omnidirectional*.



Gambar 20. Pola Radiasi Hasil Simulasi

Gambar 21, terlihat hasil gain1 sebesar 3,12 dBi dan gain2 2,54 dBi.



Gambar 21. Gain Hasil Simulasi

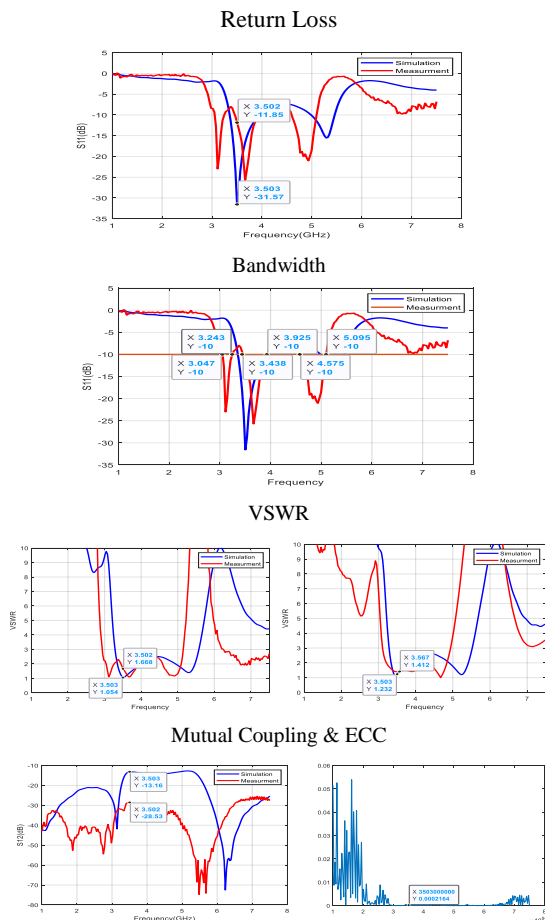
B. Hasil Pengukuran Parameter Antena MIMO 8x8

Pengukuran dilakukan untuk mengetahui parameter yang dimiliki oleh antena hasil desain dari CST Studio Suite 2019, dimana hasil pengukuran tersebut akan disimulasikan menggunakan MATLAB. Adapun parameter antena yang akan diukur dan dibandingkan dapat dilihat pada tabel 4 perbandingan parameter seperti *Return Loss*, *VSWR* (S_{11} , S_{22}), polaradiasi (vertikal, horizontal, dan samping), dan ECC (S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}).

Tabel 1. Hasil Pengukuran di Laboratorium Antena

No	Parameter Antena	Nilai	
		Simulasi	Pengukuran
1	Return Loss (dB) f=3500 MHz	-31.57	-11.85
2	Bandwidth (Mhz)	579.6	196
		441.3	487
			520
3	VSWR f= 3500 MHz	1.054	1.668
4	Mutual Coupling (dB) f=3500MHz	-13.16	-28.53
5	ECC f=3500 MHz	0.0005	0.0002
6	Pola Radiasi	Omni	omni

Dan Gambar 22, terlihat hasil pengukuran parameter *Return Loss*, *Bandwidth*, *VSWR*, *Mutual Coupling*, dan ECC yang disimulasikan menggunakan MATLAB. Pengukuran ini menggunakan alat yang telah dikalibrasi pada rentang frekuensi 1 – 7,5 GHz dengan frekuensi kerja 3,5 GHz.



Gambar 22. Hasil Pengukuran Parameter Antena Menggunakan MATLAB

C. Hasil Pengujian Antena MIMO 8x8

Pengujian Antena MIMO 8 x 8 Frekuensi kerja 3,5 GHz Untuk Teknologi 5G, telah dilakukan pada tanggal 12 Agustus 2023 di jl. Bakti II Alai Timur, Kel. Alai Parak Kopi, Kec. Padang Utara, Kota Padang. Provider Telkomsel Cell Tower, dengan Cell ID 18430, dan LAC 3160. Pada pengujian kali ini dilakukan dengan menggunakan modem WIFI, yang mana modem tersebut akan dihubungkan dengan antena MIMO 8 x 8 yang diarahkan ke tower telkomsel. Pengujian ini dites menggunakan aplikasi *speedtest* by okla pada HP Iphone 13 dengan pengujian dilakukan pada 3 jarak yaitu pada jarak 60 m, 160 m, dan 550 m. Yang mana, didapatkan hasil yang baik pada jarak 160m dengan *download* bernilai 42,8 Mbps, *upload* bernilai 15,6 Mbps.

IV. KESIMPULAN

Setelah dilakukan proses perancangan, simulasi, optimasi, dan pengukuran maka didapatkan kesimpulan hasil parameter antena antara lain sebagai berikut: *return loss* hasil simulasi didapatkan -31,57 dB, dan pengukuran didapatkan -11,85 dB. Selanjutnya, *VSWR* hasil simulasi didapatkan 1,054, hasil pengukuran 1,668. Lalu, nilai *mutual coupling* hasil simulasi didapatkan -13,16, dan pengukuran -28,53, nilai ECC hasil simulasi didapatkan 0,0005, dan pengukuran 0,0002. Dan terakhir pola radiasi pada hasil simulasi dan pengukuran didapatkan bentuk pola radiasi *omnidirectional*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan kali ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar – besarnya kepada semua pihak yang turut ikut serta dalam membantu menyelesaikan penelitian ini hingga selesai.

REFERENSI

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design Third Edition*. 2005. [Online]. Available: www.copyright.com.
- [2] E. S. Nugraha, "Rancang Bangun Antena Mikrostrip Rectangular dengan Metode Fractal Sierpinski untuk Teknologi Long Term Evolution 2300 MHz," *Jurnal Elektro dan Telekomunikasi Terapan*, vol. 8, no. 1, p. 934, Jul. 2021, doi: 10.25124/jett.v8i1.3750.
- [3] A. Sianipar, "Perancangan Dan Realisasi Antena Mikrostrip Mimo Bowtie 4X4 Dengan Corner Reflektor 90° Pada Frekuensi 1,8 Ghz Untuk Aplikasi Lte Melalui Teknik Pencatutan Mikrostrip Line," *J Phys Ther Sci*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2018, [Online].
- [4] H. Aronoff, "Technology MU-MIMO: 2x2, 3x3, 4x4," 2020. <https://www.minim.com/blog/what-is-mu-mimo-technology-2x2-3x3-4x4-explained> (accessed Jun. 20, 2023).
- [5] 5G-Indonesia, "Massive MIMO 5G," 2020. <https://www.5g-indonesia.com/2020/08/penjelasan-lengkap-massive-mimo-5g.html> (accessed Jun. 20, 2023).
- [6] J. Haidi, "Desain Antena Mikrostrip Bentuk Lingkaran Menggunakan Metode Pencatutan Langsung dan Slot Untuk Antena 5G," *JSAI (Journal Scientific and*

- Applied Informatics*), vol. 1, no. 2, pp. 35–40, 2018, doi: 10.36085/jsai.v1i2.16.
- [7] P. Uetomo, B. Sumajudin, and T. Yunita, “Analisis Antena MIMO 2x2 Berdasarkan Diversitas Polarisasi,” 2021.
- [8] M. Anthoni, R. S. Asthan, A. Pascawati, D. Maryopi, and M. R. K. Aziz, “Perancangan dan Simulasi Antena Mikrostrip MIMO 4x4 Rectangular Patch dengan Double U-Slot dan DGS pada Frekuensi 26 GHz untuk Aplikasi 5G,” *Journal of Science and Applicative Technology*, vol. 5, no. 2, p. 371, 2021, doi: 10.35472/jsat.v5i2.336.
- [9] J. Lu and D. Chian, “Compact Eight MIMO Antennas for 5G Smartphones and Their MIMO Capacity Verification,” *IEEE*, vol. 1, pp. 1054–1056, 2016.
- [10] D. Serghiou, M. Khalily, V. Singh, A. Araghi, and R. Tafazolli, “Sub-6 GHz dual-band 8 × 8 MIMO Antenna for 5G Smartphones,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 19, no. 9, pp. 1546–1550, 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3008962.
- [11] X. Zhang, Y. Li, W. Wang, and W. Shen, “Ultra-Wideband 8-Port MIMO Antenna Array for 5G Metal-Frame Smartphones,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 72273–72282, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919622.