

SISTEM ANTENA PEMANCAR MIMO (2×4, SUSUNAN 2 ELEMEN) MENGUNAKAN MULTI SUBSTRAT 3 LAYER PADA FREKUENSI 3,5 GHZ UNTUK KOMUNIKASI 5G

(*MIMO TRANSMITTER ANTENNA SYSTEM (2×4, TWO ELEMENTS
ARRAY) USING 3 LAYERS MULTI SUBSTRATE ON FREQUENCY
3,5 GHZ FOR 5G COMMUNICATION*)

NabilaAmaliaAzzahra¹, RinaPudjiAstuti², TrasmaYunita³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹nabilaamalia@students.telkomuniversity.ac.id, { ²rinapudjiastuti,

³trasmayunita}@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Kebutuhan akan komunikasi nirkabel semakin meningkat setiap tahun sehingga pengembangan komunikasi nirkabel terus dilakukan. Pemilihan multi antena dengan cara mengaplikasikan MIMO digunakan untuk memberikan *gain* dan kapasitas yang lebih besar serta untuk melayani user yang banyak secara bersamaan. Frekuensi yang digunakan pada generasi kelima (5G) berdasarkan pada persetujuan adalah frekuensi 3,5 GHz. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan sistem antena pemancar MIMO, 2x4 dengan susunan 2 elemen. Bahan yang digunakan pada substrat yaitu FR-4. Sedangkan bahan yang digunakan pada *groundplane* dan *patch* yaitu tembaga. *Patch* yang digunakan adalah patch berbentuk sirkular dan menggunakan catuan mikrostrip line. Antena yang dirancang disesuaikan dengan spesifikasi yang dibutuhkan pada teknologi 5G. Hasil yang didapatkan adalah antena memiliki $VSWR \leq 1,348$ dengan polaradiasi unidireksional, mutual coupling $\leq -21,25$ dB serta memiliki gain $\geq 7,06$ dB, bandwidth $\geq 142,9$ MHz pada frekuensi 3,32 GHz-3,36 GHz.

Kata kunci : antena, MIMO, 5G, *array*, mikrostrip, multi substrat

Abstract

The need for wireless communication is increasing every year, so that the development of wireless communication continues. Multi antenna selection by applying MIMO it is used to provide greater benefits and capacity as well as to serve multiple users simultaneously. The frequency used in the fifth generation (5G) based on the approval is the 3.5 GHz frequency. MIMO transmitter antenna system, will be designed in the form of a 2x4 with array 2 elements. The material used on the substrate is FR-4. While the material used in the groundplane and patch is copper. The patch used is circular patch and using a microstrip line feeding. An antenna designed to match the specifications needed for 5G technology. The results are antennas that have $VSWR \leq 1.348$ with unidirectional radiation pattern, mutual coupling ≤ -21.25 dB, gain ≥ 7.06 dB and bandwidth ≥ 142.9 MHz at frequency 3.32 GHz-3.36 GHz.

Keywords: antenna, MIMO, 5G, *array*, microstrip, multi substrate

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan komunikasi nirkabel semakin meningkat setiap tahun sehingga pengembangan komunikasi nirkabel terus dilakukan. Teknologi 5G akan mengakomodasi trafik data yang tinggi, bandwidth yang tinggi dengan kapasitas kanal yang lebar dan koneksi yang luas [1]. Oleh karena itu, dibutuhkan antena yang dapat mendukung perkembangan teknologi tersebut. Salah satu kunci utama komunikasi nirkabel pada teknologi 5G adalah penggunaan antena yang menggunakan lebih dari satu, baik di sisi pengirim maupun penerima, dalam hal ini Multiple Input Multiple Output (MIMO) [2]. MIMO digunakan pada antena karena terdapat keterbatasan fisik yaitu dimensi antena yang kecil. Teknologi 5G melibatkan pita frekuensi rendah di bawah 6 GHz sebagai pita inti 5G dan pita frekuensi tinggi di atas 6 GHz secara lokal dikarenakan terbatasnya karakteristik propagasi [3]. Frekuensi kerja yang ditawarkan di Indonesia pada komunikasi 5G beragam. Pita frekuensi pada sub-6 GHz termasuk sekitar 3,3 - 3,8 GHz diminati sebagai dasar untuk awal dari penggunaan 5G

secara komersial dan didukung oleh salah satu operator di Amerika yang sudah menetapkan bahwa frekuensi 3,5 GHz dapat digunakan untuk komunikasi 5G [4]. Frekuensi kerja 3,5 GHz menjadi salah satu kandidat frekuensi yang akan dimanfaatkan untuk komunikasi 5G di Indonesia.

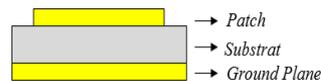
Penggunaan pita frekuensi yang tinggi dapat menyebabkan jarak pancaran menjadi lebih pendek. Untuk memperbaiki direktivitas tersebut, antena dibuat menjadi antena array sehingga dapat menambah jarak pancaran antena tanpa memperbesar ukuran antena [5]. Antena mikrostrip memiliki bentuk yang beragam. Antena dibuat menjadi antena array sehingga dapat menambah jarak pancaran antena tanpa memperbesar ukuran antena [5]. Bentuk patch persegi dan sirkular merupakan bentuk yang sederhana dan dapat digunakan dengan mudah. Selain itu, patch persegi panjang dan antena patch sirkular kompatibilitas dengan konfigurasi array. Pemilihan patch sirkular dilakukan karena memiliki bandwidth yang lebih lebar dibandingkan dengan patch persegi panjang [6]. Pencatatan yang digunakan dalam perancangan ini yaitu *mikrostrip line*. Pencatatan mikrostrip line memiliki desain yang simpel. Selain itu, posisi catuan *mikrostrip line* mudah untuk dikontrol [7].

Tugas Akhir ini dilakukan perancangan sistem antena pemancar MIMO, 2x4 dengan susunan 2 elemen *patch* sirkular yang berkerja pada frekuensi 3,5 GHz untuk pengaplikasian komunikasi 5G di Indonesia. Antena yang dirancang diharapkan memiliki spesifikasi yang diinginkan, seperti $VSWR \leq 1,5$, $bandwidth \geq 100$ MHz, $gain \geq 7$ dB, pola radiasi unidireksional dan $mutual\ coupling \leq -20$ dB.

2. Dasar Teori

2.1 Antena Mikrostrip

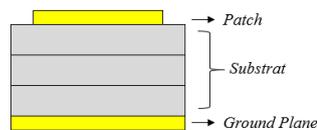
Antena mikrostrip terdiri dari 3 lapisan yaitu patch, substrat, dan ground plane. Patch dan ground plane dipisahkan oleh suatu bahan dielektrik yang disebut substrat. Antena Mikrostrip memiliki beberapa kelemahan yaitu bandwidth yang sempit dan gain yang rendah [5]. Susunan antena mikrostrip dapat dilihat pada Gambar. 1 [5].



Gambar 1. Susunan Antena Mikrostrip

2.2 Metode Multi Layer Substrat

Kelemahan antena mikrostrip yaitu bandwidth yang sempit dan gain yang rendah [5]. Oleh karena itu, diperlukan metode yang dapat meningkatkan lebar bandwidth. Jika dibandingkan dengan menggunakan 1 lapis substrat saja, antena dengan menggunakan 3 lapis substrat memiliki bandwidth yang lebih lebar hingga dua kali lipat [8]. Sehingga untuk meningkatkan bandwidth pada antena dapat menggunakan metode *multi-layer substrate* seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Susunan Antena Mikrostrip dengan Metode *Multi-Layer Substrate*

2.3 Antena Mikrostrip Array

Array pada antena yaitu menggabungkan beberapa elemen antena menjadi satu antena. Dengan menjadikan antena mikrostrip yang berbentuk tunggal menjadi array dapat meningkatkan direktivitas gain pada antena sehingga hasil yang didapatkan lebih baik [5]. Sehingga dengan menambahkan metode array kelemahan pada antena mikrostrip dapat teratasi.

2.4 MIMO

Multiple Input Multiple Output (MIMO) adalah salah satu teknologi yang digunakan pada generasi kelima. MIMO menggunakan lebih dari satu antena pada setiap pemancar atau penerima. Masing-masing antena memancarkan sinyal sehingga dapat meningkatkan kapasitas kanal tanpa

harus memperbesar bandwidth. Sistem multi antenna ini juga mampu menghindari multipath fading dan meningkatkan throughput data [3].

2.5 Teknologi 5G

Teknologi 5G dipersiapkan untuk menyediakan layanan yang akan digunakan untuk berbagai perangkat jaringan heterogen yang terus bertambah (atau disebut mesin) yang mampu berkomunikasi satu sama lain. Teknologi 5G memberikan banyak layanan, sehingga diperlukan *Base Transceiver Station* (BTS) yang mampu menampung perangkat dalam jumlah besar.

2.6 Perhitungan Dimensi Antena

Untuk menentukan dimensi patch dapat dihitung menggunakan persamaan [5],

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \frac{\pi a}{2h} + 1,7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

dengan a dan F dihitung dengan menggunakan persamaan [5],

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi F \epsilon_r} \left[\ln \frac{\pi F}{2h} + 1,7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

dimana a_e adalah jari-jari efektif *patch*, f_r adalah frekuensi resonansi, h adalah tebal dielektrik, ϵ_r adalah konstanta dielektrik substrat. Untuk catuan ke patch, digunakan metode mikrostrip *feedline*. Metode *feedline* dipilih karena lebih sesuai untuk diterapkan dibandingkan metode coaxial feed yang harus melubangi patch dan sulit dalam pembagian daya. Untuk menentukan dimensi *feed* dapat dihitung menggunakan persamaan [5]

$$w_f = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} + \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (4)$$

$$l_f = \frac{\lambda_g}{4} \quad (5)$$

dengan

$$B = \frac{60 (\pi)^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (7)$$

dengan λ_0 dan ϵ_{eff} dihitung dengan menggunakan persamaan [5],

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} \quad (8)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w_f} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

dimana c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s), f_r adalah frekuensi kerja, ϵ_r adalah konstanta dielektrik substrat, Z_0 adalah impedansi masukan (50 Ω , 100 Ω), dan h adalah tebal substrat FR-4 (Epoxy). Dimensi minimal dari ground plane dan substrat dapat dihitung dengan persamaan [5]

$$w_g = 6h + 2a_e \quad (10)$$

$$l_g = 2a_e + 3h + l_f \quad (11)$$

dimana h adalah tebal substrat FR-4 (Epoxy), a_e adalah radius patch, l_f adalah panjang catuan, w_g adalah lebar *ground plane* dan substrat, dan l_g adalah panjang *ground plane* dan substrat. Untuk merancang antenna MIMO yang tersusun lebih dari satu elemen, dibutuhkan persamaan

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

dengan d adalah jarak antar antenna. Jarak antar antenna diperlukan agar tidak terjadi mutual coupling atau munculnya tegangan di satu antenna akibat arus antenna yang berdekatan. Mutual coupling yang diinginkan yaitu ≤ -20 dB [9].

3. Perancangan dan Simulasi

3.1. Spesifikasi Antena

Antena yang dirancang adalah antenna dengan bentuk patch sirkular yang kemudian disusun menjadi dua elemen. Terdapat antenna dua elemen dengan metode multi substrat 3 layer sebanyak 8 yang akan disusun MIMO. Masing-masing antenna dicatu menggunakan teknik *microstrip line*. Bahan yang digunakan untuk pembuatan substrat yaitu FR-4. FR-4 memiliki permitivitas relatif (ϵ) = 4,3 dan ketebalan 1,6 mm. Sedangkan bahan yang digunakan pada groundplane, patch dan *feedline* antenna adalah tembaga (copper). Tembaga (copper) memiliki permitivitas relatif (ϵ) = 1 dan ketebalan 0,035 mm. Frekuensi kerja pada antenna yang dirancang berada pada 3,5 GHz. Pada teknologi 5G, *bandwidth* yang dibutuhkan ≥ 100 MHz [10]. Spesifikasi antenna dan parameter yang ditargetkan tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Antena

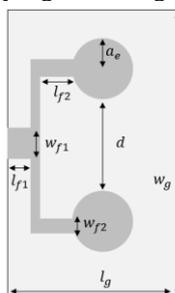
Parameter	Spesifikasi
Frekuensi Kerja	3,5 GHz
VSWR	$\leq 1,5$
Bandwidth	≥ 100 MHz
Gain	≥ 7 dBi
Pola Radiasi	Unidireksional
Mutual Coupling	≤ -20

3.2. Perancangan Antena Tunggal

Tahap pertama adalah perancangan antenna mikrostrip elemen tunggal. Pada tahap ini dilakukan pemilihan bahan substrat, penentuan dimensi antenna, dan penentuan dimensi pada saluran pencatu. Pada frekuensi tengah didapatkan VSWR sebesar 1,064. Selain itu bandwidth yang didapatkan yaitu sebesar 83,3 MHz. Nilai gain yang diperoleh pada perancangan antenna elemen tunggal yaitu sebesar 4,117 dBi dengan polaradiasi unidireksional. Hasil yang didapatkan pada simulasi antenna satu elemen belum memenuhi spesifikasi yang diharapkan, sehingga perlu menambahkan sebuah metode. Metode yang digunakan yaitu metode multi substrat 3 layer. Pada frekuensi tengah didapatkan VSWR sebesar 1,024. Dengan penambahan metode multi substrat 3 layer, bandwidth yang didapatkan meningkat dari 83,3 MHz menjadi 105 MHz. Nilai gain yang diperoleh yaitu sebesar 4,747 dBi dengan polaradiasi unidireksional.

3.2. Perancangan Antena Dua Elemen

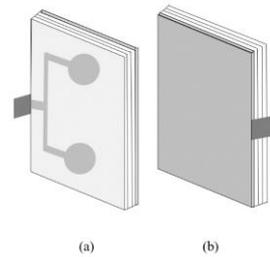
Hasil yang didapatkan pada simulasi antenna satu elemen belum memenuhi spesifikasi yang diharapkan, sehingga perlu menambahkan sebuah metode. Metode yang digunakan yaitu metode *array*. Antena dua elemen dengan metode yang dirancang ditunjukkan pada Gambar. 3



Gambar 3 Desain Antena Dua Elemen

Pada frekuensi tengah didapatkan VSWR sebesar 1,058. Selain itu bandwidth yang didapatkan yaitu sebesar 80,2 MHz. Nilai gain yang diperoleh yaitu sebesar 6,057 dBi dengan polaradiasi unidireksional. Hasil yang didapatkan pada simulasi antenna dua elemen belum memenuhi spesifikasi

yang diharapkan, sehingga perlu menambahkan sebuah metode. Metode yang digunakan yaitu metode multi substrat 3 layer. Desain antenna dua elemen dengan metode multi substrat 3 layer yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 4.

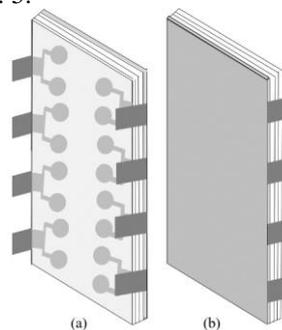


Gambar 4 Simulasi Antena Dua Elemen dengan Metode Multi Substrat 3 Layer (a) tampak depan (b) tampak belakang

Pada frekuensi tengah didapatkan VSWR sebesar 1,058. Dengan penambahan metode multi substrat 3 layer, *bandwidth* yang didapatkan meningkat dari 80,2 MHz menjadi 188,8 MHz. Nilai gain yang diperoleh yaitu sebesar 8,388 dBi dengan pola radiasi unidireksional.

3.2. Perancangan Antena MIMO

Setelah dilakukan perancangan dan penyimulasian menggunakan perangkat lunak pada antenna dua elemen, langkah selanjutnya yaitu menyusun antenna tersebut menjadi antenna MIMO yang terdiri dari 8 antenna. Pada frekuensi tengah didapatkan VSWR sebesar 1,14. Selain itu, *bandwidth* yang diperoleh belum memenuhi yaitu $bandwidth \leq 100$ MHz, nilai *bandwidth* yang diperoleh sebesar 71,4 MHz. Nilai gain yang diperoleh yaitu sebesar 5,243 dBi dengan polaradiasi unidireksional. Hasil yang didapatkan pada simulasi belum memenuhi spesifikasi yang diharapkan, sehingga perlu menambahkan sebuah metode. Metode yang digunakan yaitu metode multi substrat 3 layer. Desain sistem antenna pemancar MIMO, 2x4 susunan 2 elemen dengan metode multi substrat 3 layer yang dirancang ditunjukkan pada Gambar. 5.



Gambar 5 Desain Antena MIMO dengan metode Multi Substrat 3 Layer (a) tampak depan (b) tampak belakang

Pada frekuensi tengah didapatkan VSWR terkecil 1,345 dan VSWR terbesar 1,348. Selain itu, pada frekuensi tengah didapatkan $bandwidth \geq 100$ MHz yaitu 142,9 MHz dan 153,6 MHz. *Mutual coupling* yang didapatkan sudah sesuai yang diharapkan ≤ -20 dB yaitu -21,25 dB dan -55,18 dB. Gain yang di dapatkan sudah sesuai yang diinginkan ≥ 7 dB yaitu 7,582 dB dan 7,548 dB .

4. Analisis

Setelah dilakukan simulasi pada perangkat lunak, maka parameter yang dihasilkan dari simulasi tersebut dianalisis. Pengujian dilakukan terhadap parameter kerja yang sudah ditentukan sebelumnya. Parameter kerja tersebut antara lain *gain*, pola radiasi, VSWR, *bandwidth*, dan *mutual coupling*.

4.1 VSWR, Gain, dan Bandwidth

Pada antenna 1,4,5 dan 8 nilai VSWR, *gain* dan *bandwidth* yang didapatkan memiliki nilai yang serupa. Selain itu, pada antenna 2, 3, 6, dan 7 VSWR, *gain* dan *bandwidth* yang didapatkan juga memiliki nilai yang serupa. Hal ini dikarenakan penempatan dan posisi antenna yang sama tetapi berbeda arah.

Tabel 2. Rincian Parameter Sebelum Penambahan Metode Multi Substrat 3 Layer

Antena	Parameter		
	Gain (dB)	Bandwidth (MHz)	VSWR
1	5,243	70,5	1,173
2	5,382	71,4	1,164
3	5,382	71,4	1,164
4	5,243	70,5	1,173
5	5,243	70,5	1,173
6	5,382	71,4	1,164
7	5,382	71,4	1,164
8	5,243	70,5	1,173

Tabel 3. Rincian Parameter Sesudah Penambahan Metode Multi Substrat 3 Layer

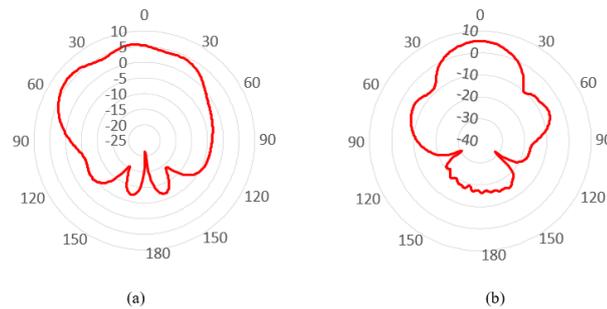
Antena	Parameter		
	Gain (dBi)	Bandwidth (MHz)	VSWR
1	7,062	153,6	1,345
2	7,115	142,9	1,348
3	7,115	142,9	1,348
4	7,062	153,6	1,345
5	7,062	153,6	1,345
6	7,115	142,9	1,348
7	7,115	142,9	1,348
8	7,062	153,6	1,345

Dari hasil simulasi ini, penambahan metode multi substrat 3 layer juga dapat meningkatkan *gain*. Jika pada Tabel 2 gain terbesar yang di dapatkan hanya 5,382 dB, pada Tabel 3 gain terbesar yang didapatkan naik hingga 7,115 dB. Gain terkecil yang di dapatkan dengan metode multi substrat 3 layer meningkat dari 5,243 dBi ke 7,062 dBi. Pada antena 1,4,5 dan 8 nilai gain yang didapatkan memiliki nilai yang serupa. Selain itu, pada antena 2, 3, 6, dan 7 gain yang didapatkan juga memiliki nilai yang serupa. Gain yang dihasilkan oleh antena tersebut memiliki nilai yang berbeda namun selisih nilai tersebut tidak terlalu jauh. Hal ini dikarenakan penempatan dan posisi antena yang sama tetapi berbeda arah. Nilai gain yang diperoleh turun dari 8,388 dBi pada antena dua elemen menjadi 7,115 dBi pada antena MIMO. Terdapat penurunan gain sebesar 1,273 dBi pada antena dua elemen setelah disusun MIMO.

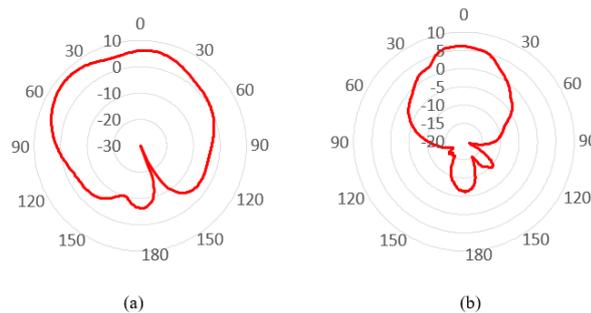
4.2 Mutual Coupling

Analisis ini dilakukan pada antena MIMO frekuensi 3,5 GHz dengan melihat pengaruh mutual coupling melalui perbandingan saat sebelum dan sesudah menambahkan metode multi substrat 3 layer. Nilai *mutual coupling* yang didapatkan saat sebelum menambahkan metode multi-layer substrate sandwich, mutual coupling terbesar bernilai -24,438 dB dan terkecil bernilai -70,623 dB. Setelah menambahkan metode multi substrat 3 layer, nilai *mutual coupling* berubah dengan nilai terbesar -21,25 dB dan nilai terkecil -55,18 dB. Dari hasil simulasi, sebelum menambahkan metode multi substrat 3 layer pada antena MIMO, nilai mutual coupling terbesar yang didapatkan lebih kecil dibandingkan sesudah menambahkan metode multi substrat 3 layer. Sehingga dengan adanya penambahan metode multi substrat 3 layer akan mempengaruhi nilai *mutual coupling* menjadi lebih besar.

4.3 Pola Radiasi



Gambar. 6 Pola Radiasi tanpa Metode Multi Substrat 3 Layer (a) azimuth (b) elevasi



Gambar. 7 Pola Radiasi dengan Metode Multi Substrat 3 Layer (a) azimuth (b) elevasi

Gambar 6 dan Gambar 7 adalah pola radiasi antenna pada arah Azimut dan elevasi untuk antenna tanpa multi substrat 3 layer dan dengan multi substrat 3 layer. Pada arah azimut, kedua antenna memiliki arah pancar maksimum pada sudut -60° , sedangkan pada arah elevasi, kedua antenna memiliki arah pancar maksimum pada sudut 0° . Dari arah pancar tersebut, dapat disimpulkan bahwa antenna tanpa multi substrat 3 layer maupun menggunakan multi substrat 3 layer memiliki arah pancar unidireksional.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini, hasil dari simulasi yang sudah dilakukan menghasilkan beberapa kesimpulan antara lain:

1. Pola radiasi dan gain pada simulasi antenna MIMO dua elemen dengan metode multi substrat 3 layer menghasilkan pola radiasi unidireksional untuk masing-masing antenna. Nilai *gain* yang didapatkan sudah sesuai dengan yang diharapkan yaitu $gain \geq 7$ dB, dengan nilai gain terkecil yaitu 7,062 dB dan nilai gain terbesar yaitu 7,115 dB. Penggunaan metode *array* dan multi substrat 3 layer dapat meningkatkan *gain* yang diperoleh menjadi lebih lebar yaitu dari 5,243 dB menjadi 7,115 dB.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai dari VSWR paling kecil adalah 1,348. Untuk lebar pita, nilai terkecil yang didapatkan yaitu 142,9 MHz sedangkan nilai terbesar yang didapatkan yaitu 153,6 MHz. Penggunaan metode multi substrat 3 layer dapat meningkatkan bandwidth yang diperoleh menjadi lebih lebar yaitu dari 70,5 MHz menjadi 142,9 MHz.
3. Nilai mutual coupling yang didapatkan sudah tercapai sesuai dengan yang diharapkan yaitu nilai mutual coupling ≤ -20 dB. Pada simulasi ini, nilai mutual coupling terkecil yang didapatkan yaitu -55,18 dB dan nilai terbesar yang didapatkan yaitu -21,25. Penggunaan metode multi substrat 3 layer membuat nilai mutual coupling menjadi semakin besar.

5.2 Saran

Pada penelitian ini, hasil dari simulasi yang sudah dilakukan menghasilkan beberapa saran antara lain:

1. Penggunaan bentuk patch yang lain dapat dilakukan untuk mengetahui hasil yang lebih maksimal.
2. Penambahan elemen pada sistem MIMO dapat dilakukan agar hasil yang didapatkan lebih maksimal.

Reference

- [1] S. Zulpratita, "Kunci teknologi 5g," Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Terapan, vol. IV, no. 2,
- [2] Y. Huang, Y. Li, H. Ren, J. Lu, and W. Zhang, "Multi-Panel MIMO in 5G," IEEE
- [3] F. Hu, B. Chen, and K. U. N. Zhu, "Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks
- [4] Qualcomm, "Spectrum for 4G and 5G," Qualcomm Technology, Tech. Rep., 2017.
- [5] C. a. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Arizona: A JOHN WILEY & SONS, INC, 2012.
- [6] M. M. Khan, A. K. M. M. Alam, and R. H. Ashique, "A Comparative Study of Rectangular and Circular Microstrip Fed Patch Antenna at 2.45 GHz," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 5, Issue 10, vol. 5, no. 10, pp. 1028–1032, 2014.
- [7] A. K. Shrivastava, R. Mishra, R. G. Mishra, and R. Bharti, "Effect of Microstrip Line Dimensions on Bandwidth Enhancement of a Regular Microstrip 65 Antenna," 3rd International Conference and Workshops on Recent Advances and Innovations in Engineering, ICRAIE 2018, vol. 2018, no. November, pp. 1–4, 2018.
- [8] G. Manjunath, Naseeruddin, and K. M. Sadyojatha, "Design and analysis of circular MPA using multi-layer substrate sandwich for bandwidth enhancement," 2017 International Conference on Information Communication and Embedded Systems, ICICES 2017, no. Icices, pp. 1–4, 2017.
- [9] P. Eskelinen, *Introduction to RF Equipment and System Design*. London: Artech House, 2004.
- [10] E. Mohyeldin, "Minimum Technical Performance Requirements for IMT-2020 radio interface(s)," p. 12, 2016.