

**SISTEM ANTENA PEMANCAR MIMO (4×4) MENGGUNAKAN MULTI
SUBSTRAT DAN AIR GAP PADA FREKUENSI 3,5 GHz
UNTUK KOMUNIKASI 5G**
*MIMO ANTENNA TRANSMITTER SYSTEM (4×4) USING
MULTI SUBSTRATE AND AIR GAP ON FREQUENCY 3.5 GHz
FOR 5G COMMUNICATION*

Muhammad Daffa Rheza¹, Rina Pudji Astuti², Trasma Yunita³

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

¹daffamuhrheza@gmail.com, ²rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id,

³trasmayunita@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi telekomunikasi tiap tahunnya sangat pesat, termasuk pada teknologi generasi ke-5 (5G) juga terus dilakukan riset dan implementasi. Teknologi 5G di Indonesia saat ini sedang dilakukan pengembangan spektrum frekuensi oleh Kementerian Komunikasi dan Informatika (KEMKOMINFO), yaitu dengan frekuensi 3,5 GHz yang dinyatakan ideal untuk kebutuhan di Indonesia. Dengan frekuensi yang tinggi tersebut, maka diperlukan antenna jenis mikrostrip serta dengan susunan sistem *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) agar dapat memberikan *bandwidth* transmisi yang lebar. Pada Tugas Akhir dilakukan perancangan sistem antenna pemancar MIMO (4×4) pada frekuensi 3,5 GHz, yang dimana terdapat 16 elemen dengan 4 baris dan 4 kolom elemen, serta menggunakan patch berbentuk sirkular. Patch sirkular dipilih karena dapat memberikan gain yang baik. Selain itu, juga dibantu dengan penggunaan metode multi substrat dan air gap untuk meningkatkan *bandwidth* dan gain dalam pencapaian spesifikasi 5G. Bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 karena dapat memberikan impedansi yang baik, dengan memiliki ketebalan (h) 1.6 mm dan permitivitas dielektrik (ϵ_r) 4,3. Serta digunakan pencatutan *coaxial probe* agar memudahkan dalam pengaplikasian pada sistem antenna MIMO. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, sistem antenna pemancar MIMO dengan metode *multi substrate* dan *air gap* dihasilkan gain maksimal sebesar 7,314 dBi dan gain minimal sebesar 6,778 dBi. Kemudian didapatkan bandwidth sebesar 104 MHz (3,447-3,551 GHz) hingga 107 MHz (3,443-3,550 GHz). Serta, *mutual coupling* pada sistem MIMO didapatkan paling besar -21,427 dB dan paling kecil -48,304 dB.

Kata kunci : Antena Mikrostrip, Patch Sirkular, MIMO, 5G.

Abstract

The development of telecommunications technology become strict every year, including in the 5th generation technology (5G), research and implementation are also being carried out. The Ministry of Communication and Information Technology (KEMKOMINFO) is currently developing the frequency spectrum in Indonesia, by 3.5 GHz frequency which is declared ideal for the needs in Indonesia. With this high frequency, a microstrip type antenna is needed and also a Multiple Input Multiple Output (MIMO) system arrangement is needed in order to provide a wide transmission bandwidth. In this final project, (4×4) MIMO transmitter antenna system on frequency 3.5 GHz designed, which is 16 elements with 4 rows and 4 columns of elements, and using a circular shape *patch*. Circular patches are chosen because it can provide to a increase gain. Than, it is helped by the use of multi substrate and air gap methods for increasing bandwidth even gain in reaching to 5G specifications. The substrate material used FR-4 because it can give a good impedance matching, with has a thickness (h) 1.6mm and a dielectric permittivity (ϵ_r) 4.3. Based on the simulation, a MIMO transmitter antenna system using the multi substrate and air gap method resulted in a maximum gain is 7.314 dBi and a minimum gain is 6.778 dBi. Then obtained bandwidth of 104 MHz (3.447-3.551 GHz) to 107 MHz (3.443-3.550 GHz). Meanwhile, mutual coupling on the MIMO system obtained at -21.427 dB and the smallest at -48.304 dB.

Keywords: Microstrip Antenna, Circular Patch, MIMO, 5G.

1. Pendahuluan

Teknologi telekomunikasi berkembang dengan pesat. Seperti diketahui, perkembangan teknologi telekomunikasi seluler dimulai dari generasi pertama (1G) hingga generasi ke-5 (5G) yang sampai saat ini di beberapa negara sedang dilakukan riset dan implementasi. Teknologi 5G memberikan sebuah tantangan untuk mengatasi 6 tantangan yang belum bisa ditangani secara efektif oleh 4G yaitu, menaikkan kapasitas kanal, menaikkan kecepatan data, menurunkan latensi *end to end*, konektifitas perangkat masif, dan konsisten *quality of experience provisioning*. Sehingga teknologi 5G diprediksi akan membutuhkan transformasi dari kebutuhan frekuensi *carrier* yang sangat tinggi [1].

Pihak Kementerian Komunikasi dan Informatika (KEMKOMINFO) sudah memberikan pernyataan bahwa spektrum frekuensi 3,5 GHz sangat ideal untuk kebutuhan dari teknologi 5G di Indonesia, serta *International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R)* sudah memberikan syarat spesifikasi 5G secara *general* terutama pada *bandwidth* yang setidaknya dapat mencapai 100 MHz [2] [3]. Dengan frekuensi kerja yang tinggi dapat menghasilkan *bandwidth* yang besar, namun dapat menimbulkan *multiple fading* serta membuat dimensi antenna menjadi kecil. Dengan begitu, diperlukan sistem antenna *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* untuk mengatasi masalah tersebut. Kemudian dengan penggunaan jenis antenna mikrostrip pada rangkaian sistem MIMO merupakan pilihan yang tepat, hal ini karena antenna mikrostrip dapat bekerja pada frekuensi yang tinggi [1] [4]. Pada suatu penelitian, telah dilakukan perbandingan performa antenna tunggal menggunakan pencatutan *coaxial probe*. Dimana antenna dengan *patch* sirkular menghasilkan *gain* yang lebih baik jika dibandingkan dengan antenna *patch rectangular*. Perbedaan *gain* dapat dibilang cukup signifikan, dilihat pada *patch rectangular* didapatkan *gain* 2,76 dBi, sementara dengan menggunakan *patch* sirkular didapatkan *gain* 2,93 dBi [5].

Pada penelitian ini dibahas mengenai pengujian sistem antenna pemancar MIMO sirkular pada frekuensi 3.5 GHz yang disusun 4 baris dan 4 kolom elemen, yang dimana pada setiap elemennya dicatu. Serta menggunakan metode *multi* substrat dan metode *air gap* untuk mendapatkan beberapa spesifikasi yang ideal pada teknologi 5G.

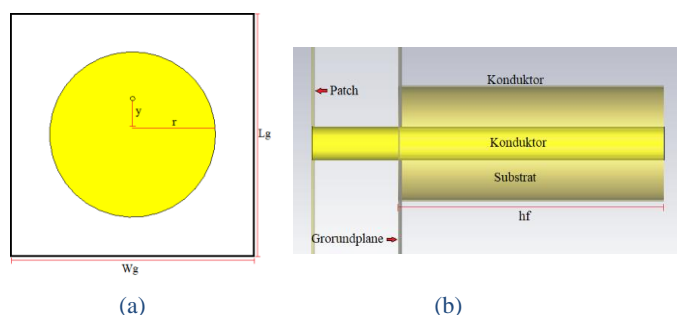
2. Dasar Teori

2.1 Kajian 5G Pada Frekuensi 3,5 GHz

Teknologi telekomunikasi seluler generasi ke-5 (5G) adalah sebuah teknologi yang memiliki karakter berkerja pada frekuensi tinggi. Dengan begitu, untuk mencapai mencapai nilai *coverage* tertentu, teknologi 5G memerlukan banyak *base station* dan diharapkan mampu menyediakan spektrum frekuensi 3,5 GHz. Dari beberapa operator yang ada di Indonesia, Telkomsel sudah melakukan *trial* layanan 5G pada saat penyelenggaraan *Asian Games* pada tahun 2018. Pada saat itu Telkomsel menggunakan spektrum 2.8 GHz seperti yang ditawarkan KEMKOMINFO. Berdasarkan ekosistem Indonesia, spektrum 3,5 GHz sebenarnya sangat ideal untuk dialokasikan pada teknologi 5G, namun kendala yang dihadapi pada slot 3,5 GHz adalah masih adanya layanan satelit pada slot tersebut [2].

2.2 Antena Mikrostrip Patch Sirkular

Pada era 5G, antenna mikrostrip menjadi salah satu pilihan yang dipakai karena mampu bekerja pada frekuensi tinggi [4]. Struktur antenna mikrostrip terdiri dari, *patch*, substrat, dan *ground plane*. *Patch* yang berbahan konduktor dicetak di atas substrat berbahan dielektrik yang tipis dengan *ground plane* yang berbahan konduktor di bagian bawah. Tebal antenna mikrostrip biasanya kurang dari $0,05\lambda$, dimana λ merupakan panjang gelombang di ruang bebas [6]. Antena mikrostrip yang menggunakan *patch* sirkular merupakan konfigurasi yang populer selain konfigurasi *patch* persegi panjang [7]. Pemilihan *patch* berbentuk sirkular mengikuti acuan pada penelitian [5] yang dimana perbandingan dilakukan antara *patch* sirkular dan *rectangular*. Pada penelitian tersebut, *patch* sirkular mendapatkan *gain* yang lebih baik dibandingkan dengan *patch rectangular*.



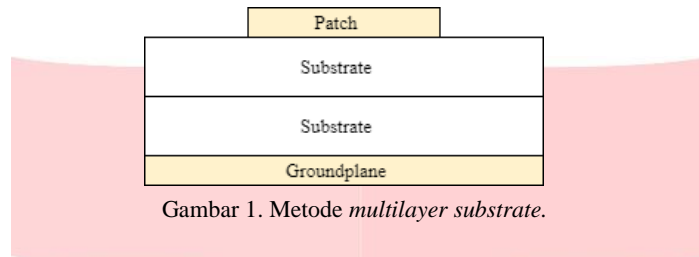
Gambar 1. Antena mikrostrip. (a) antena *patch* sirkular. (b) *coaxial probe feed*.

Pada perancangan antenna *patch* sirkular digunakan teknik pencatutan *coaxial probe*. Dimana pada teknik ini, konduktor dapat diletakkan di titik manapun, teknik pencatutan ini terdiri dari kabel *coaxial* yang bagian luar konduktor terhubung pada *groundplane*, sedangkan konduktor bagian dalam menembus substrat dielektrik dan

struktur yang dicetak seperti pada Gambar 1. Adapun untuk letak *feed* atau *feed point probe* menurut sumber [8], *feed point* berada pada rentang $0,3r$ sampai $0,5r$.

2.3 Metode Multilayer Substrate

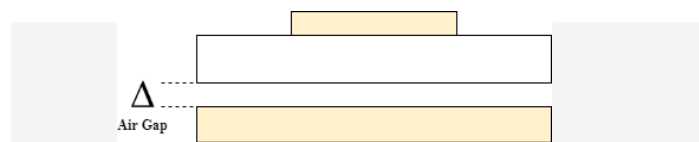
Metode *multilayer substrate* atau biasa dikenal dengan teknik *sandwich substrate* merupakan sebuah upaya untuk meningkatkan *bandwidth* dengan melakukan penumpukan *substrate* yang berada di antara *groundplane* dan *patch* pada bagian atas seperti pada Gambar 2. Pada penelitian yang sudah ada, dengan menggunakan *multilayer substrate* memberikan kenaikan *bandwidth* beberapa kali lipat dibandingkan dengan hanya menggunakan *substrate* tunggal [9].



Gambar 1. Metode *multilayer substrate*.

2.4 Metode Air Gap

Metode *air gap* atau juga dikenal *foam layer*. Pada metode ini, antenna didesain dengan membuat celah udara pada setiap lapisan sesuai dengan kebutuhan yang akan dibuat, seperti pada Gambar 3. Sehingga membuat semakin tebalnya antenna, yang menghasilkan penurunan pada permitivitas relatif. Dengan begitu, dapat membuat peningkatan pada *bandwidth* [10].

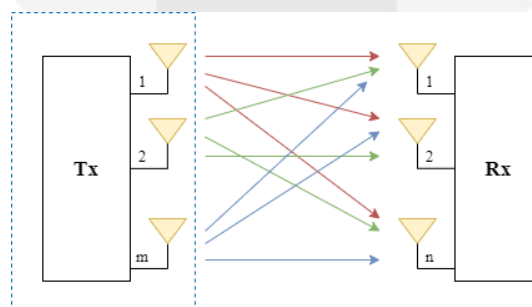


Gambar 2. Metode *air gap*.

Pada penelitian [10], dilakukan pengujian antenna menggunakan metode *air gap* dengan dibuat celah udara yang diletakkan antara substrat dan *groundplane*. Pada pengujian tersebut, didapatkan perbandingan antara antenna tanpa metode dengan yang menggunakan *air gap*. Dimana hasil menunjukkan, penggunaan *air gap* dapat memperlebar *bandwidth* secara signifikan, serta dapat menaikkan *gain*.

2.5 MIMO

Sistem *multiple-input multiple-output* (MIMO) merupakan sistem antenna yang menggunakan jumlah jamak baik pada *transmitter* (Tx) maupun *receiver* (Rx), seperti pada Gambar 4. Seperti diketahui, MIMO menggunakan teknik *diversity* dan *multiplexing*, sehingga dapat memperbaiki faktor kualitas sinyal yang diterima dan dapat meningkatkan kapasitas sistem [11].



Gambar 3. MIMO.

Pada sistem MIMO interaksi antar elemen antenna atau *mutual coupling* perlu diperhatikan, karena interferensi yang diberikan akan berefek pada impedansi dan pola radiasi. *Mutual coupling* yang kurang dari -20 dB menandakan tingkat interferensi yang didapatkan rendah [12] [13]. Pada penelitian yang dilakukan, hanya terfokus pada antenna *transmitter* pada sistem MIMO.

3. Perancangan Sistem Antena

3.1 Spesifikasi Antena

Penentuan spesifikasi antena merupakan proses yang perlu dilakukan sebagai acuan dalam perancangan dan simulasi antena. Spesifikasi ditentukan mengacu pada sumber penelitian [3] untuk *bandwidth*. Sementara untuk gain mengikuti acuan pada penelitian [14] dengan diikuti pembuktian pada perhitungan link budget.

Tabel 1. Spesifikasi antena.

Parameter	Spesifikasi
Frekuensi	3,5 GHz
<i>Bandwidth</i>	≥ 100 MHz
<i>Gain</i>	$\geq 6,5$ dB
VSWR	$\leq 1,5$ dB
Pola Radiasi	Unidireksional
<i>Mutual Coupling</i>	< -20 dB

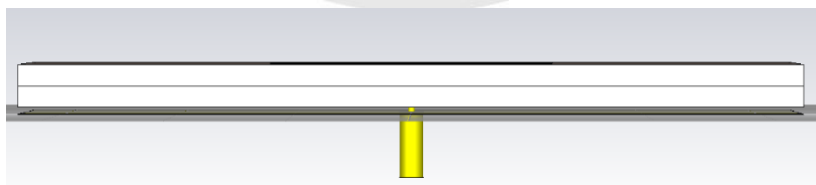
Selain mengacu pada spesifikasi pada Tabel 1, maka diperlukan juga pemilihan karakteristik bahan antena baik dari substrat maupun konduktor. Bahan substrat atau dielektrik digunakan tipe FR-4 dengan tebal bahan (h) adalah $1,6\text{mm}$ dan permitivitas dielektrik (ϵ_r) adalah 4,3. Dengan digunakannya permitivitas dielektrik yang tinggi tersebut, maka diharapkan dimensi antena yang kecil. Sehingga dapat mempermudah ke dalam perancangan sistem MIMO. Kemudian untuk bahan konduktor digunakan bahan *copper* dengan ketebalan $0,035\text{mm}$. Serta bahan pencatutan *probe* digunakan teflon (PTFE) dengan (ϵ_r) adalah 2,1.

3.2 Perancangan Antena

Pada penelitian dilakukan perancangan sistem MIMO 16 elemen dengan pola 4×4 untuk frekuensi 3.5 GHz, namun terlebih dahulu dilakukan perancangan dan simulasi antena sirkular tunggal. Adapun pencatutan menggunakan teknik *coaxial probe* sehingga *feed point* perlu dilakukan beberapa skenario percobaan. Maka dari itu, dibuat 3 skenario untuk mencari titik yang memberikan hasil optimal. Percobaan skenario untuk peletakan *feed point* dengan permisalan $x = 0$ di sumbu $y = 5$, $y = 5,5$, dan $y = r/2$ yang dihitung dari titik tengah *patch*. Setelah didapatkan *feed point* paling optimal. Sehingga dinyatakan hasil pada Tabel 2 dan ditentukan penggunaan *feed point* pada $y = 5$ mm karena didapatkan hasil yang paling optimal.

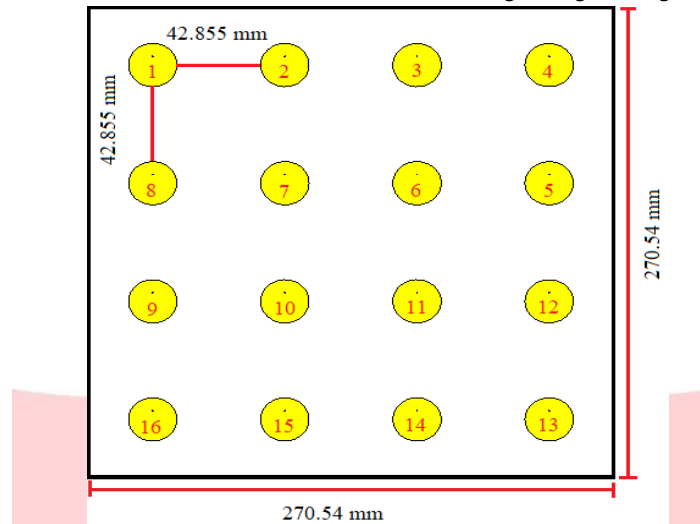
Tabel 2. Skenario *feed point*.

Feed Point	Impedansi	Bandwidth	Gain
$y = 5$ mm	$49,943 \Omega$	73 MHz	3,726 dBi
$y = 5.5$ mm	$57,316 \Omega$	73 MHz	3,686 dBi
$y = 6,1155$ mm	$63,8 \Omega$	60 MHz	3,642 dBi



Gambar 4. Multilayer substrate dan air gap.

Gambar 4 setelah dilakukan penentuan *feed point*, maka antena tunggal dilanjutkan dengan optimasi metode menggunakan *multilayer substrate* dan *air gap*. Pada perancangan *multilayer substrate* digunakan dua *layer substrate*. Sementara *air gap* diletakkan diantara *grounplane* dan substrat. Untuk pengoptimasian dilakukan secara berurut dimulai dari metode *multilayer substrate* dan dilanjut dengan metode *air gap*. Setelah metode yang dilakukan sudah mencapai spesifikasi yang ditentukan, maka dilanjutkan pada perancangan MIMO.



Gambar 5. Perancangan MIMO pola 4x4.

Pada perancangan MIMO dibuat dari 16 elemen antenna sirkular tunggal yang sudah dilakukan optimasi, kemudian dibentuk dengan pola 4x4 seperti pada Gambar 5. Namun terdapat aspek utama yang perlu diperhatikan, yaitu pada peletakkan antar elemen-elemen *patch* yang dapat menimbulkan pengaruh berupa *overlap* atau kebocoran daya yang dipancarkan. Hal tersebut merupakan pengaruh *mutual coupling*. Oleh karena itu, jarak letak elemen antenna pada perancanfan sistem MIMO 4x4 diatur dengan jarak 0.5λ atau lebih untuk menghindari hal tersebut. Berdasarkan dari hasil optimasi, didapatkan parameter perancangan antenna MIMO pada Tabel 3.

Tabel 3. Dimensi antenna MIMO.pola 4x4.

Variabel	Ukuran Dimensi	Deskripsi
h	1,6 mm	Tebal dielektrik
t	0,035 mm	Tebal konduktor
ri	0,3 mm	Jari-jari dalam <i>probe feed</i>
ro	1,005 mm	Jari-jari luar <i>probe feed</i>
r	12,39 mm	Jari-jari <i>patch</i>
y	5 mm	<i>Feed point</i>
lg	270,54 mm	Panjang <i>ground</i>
wg	270,54 mm	Lebar <i>ground</i>
hf	5 mm	Tinggi <i>probe</i>
gap	0,5 mm	<i>Gap</i> atau celah

4. Analisis Hasil Simulasi

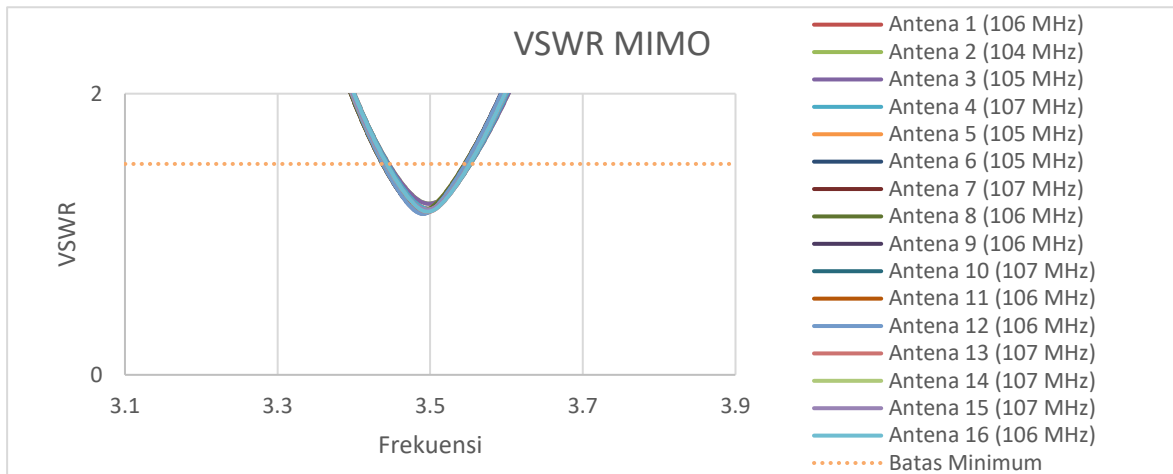
4.1 Analisis Pada Antena Tunggal

Pada Tabel 4, dihasilkan *gain* yang meningkat di angka 6,131 dBi. Namun dengan metode *air gap* membuat *bandwidth* menurun hingga 102 MHz. Dengan digunakannya metode *air gap* pada antenna tunggal dengan *multilayer substrate* dinyatakan dapat mengurangi *bandwidth*, namun dapat meningkatkan *gain*. Dalam hal ini, antenna tunggal dinyatakan sudah optimal, jika optimasi *gain* dilanjutkan maka dapat berdampak pada penurunan *bandwidth*.

Antena Tunggal	VSWR	Bandwidth	Gain	Pola Radiasi
Sirkular (tanpa metode)	1,31	73 MHz	3,726 dBi	Unidireksional
<i>Multilayer substrate</i>	1,131	153 MHz	4,877 dBi	Unidireksional
<i>Multilayer substrate</i> + <i>Air gap</i>	1,198	102 MHz	6,131 dBi	Unidireksional
Spesifikasi	≤ 1.5	≥ 100 MHz	$\geq 6,5$ dBi	Unidireksional

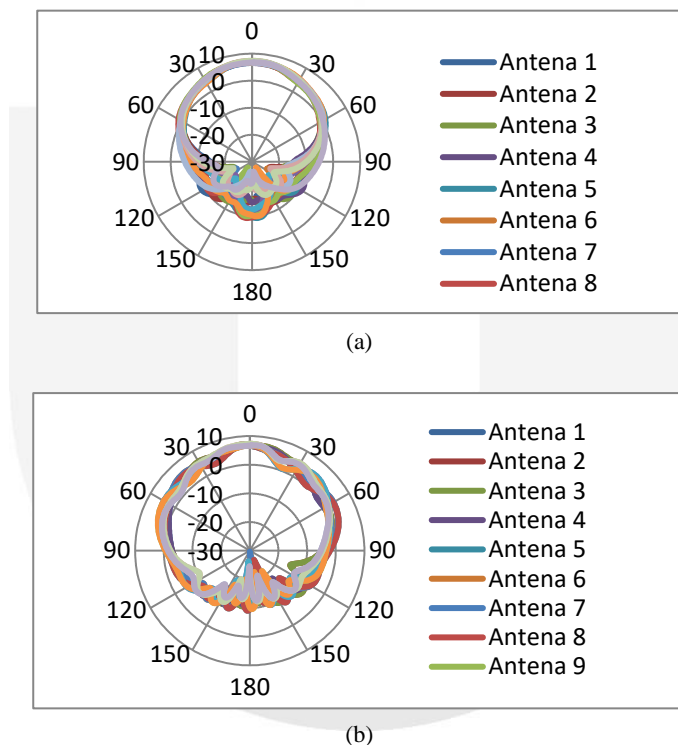
Tabel 4. Perbandingan optimasi perancangan antenna tunggal.

4.2 Analisis MIMO



Gambar 6. Grafik VSWR MIMO.

Berdasarkan pada Gambar 6 semua elemen antenna pada sistem MIMO ditunjukkan VSWR yang sudah melampaui spesifikasi VSWR atau batas minimal $\leq 1,5$. Dimana VSWR yang paling kecil didapatkan 1,160 pada antenna 13, sedangkan hasil yang paling besar 1,218 pada antenna 2. Sementara untuk *bandwidth*, maksimal di nilai 107 MHz pada antenna 4, 7, 10, 13, 14, dan 15. Serta hasil minimal di 104 MHz hanya pada antenna 2. Dengan begitu, dapat disimpulkan bahwa pemasangan antenna tunggal *multilayer substrate* dan *air gap* pada sistem MIMO 4x4, dapat meningkatkan *bandwidth*.



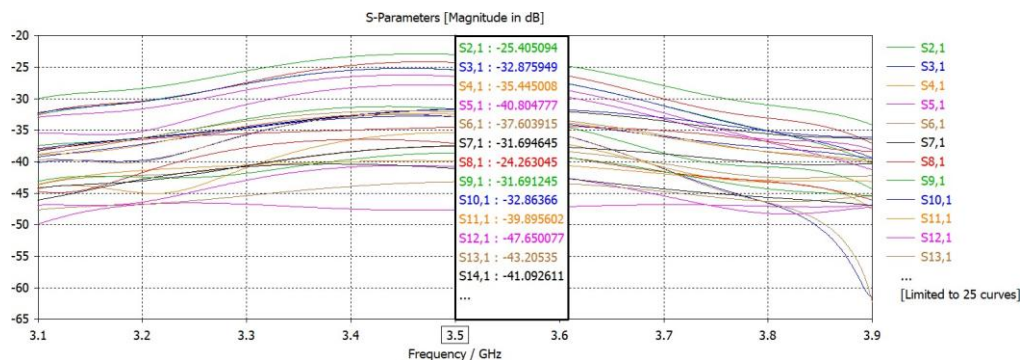
Gambar 7. Pola radiasi MIMO. (a) azimuth. (b) elevasi.

Gambar 7 pada 16 elemen antenna ditunjukkan pola radiasi secara azimuth dan elevasi. Pola radiasi ditunjukkan hanya satu area terjauh, sehingga dapat dikatakan antenna memiliki pola radiasi unidireksional. Dengan begitu, antenna MIMO dapat dikatakan memiliki pola radiasi unidireksional, meskipun dapat dilihat antenna memiliki *back lobe* yang besar. Adapun pada Tabel 5 ditunjukkan parameter-parameter yang didapatkan dari ke 16 elemen antenna ke dalam perancangan sistem MIMO pola 4x4.

Tabel 5. Parameter 16 elemen MIMO.

Antena	VSWR	Bandwidth	Gain	Antena	VSWR	Bandwidth	Gain
1	1,183	106 MHz (3,445-3,551 GHz)	6,932 dBi	9	1,164	106 MHz (3,439-3,545 GHz)	6,778 dBi
2	1,218	104 MHz (3,447-3,551 GHz)	7,229 dBi	10	1,167	107 MHz (3,439-3,546 GHz)	7,079 dBi
3	1,217	105 MHz (3,446-3,551 GHz)	7,229 dBi	11	1,165	106 MHz (3,439-3,545 GHz)	7,079 dBi
4	1,181	107 MHz (3,445-3,552 GHz)	6,932 dBi	12	1,163	106 MHz (3,439-3,545 GHz)	6,778 dBi
5	1,183	105 MHz (3,438-3,543 GHz)	6,812 dBi	13	1,160	107 MHz (3,443-3,550 GHz)	6,899 dBi
6	1,174	105 MHz (3,439-3,544 GHz)	6,880 dBi	14	1,176	107 MHz (3,443-3,550 GHz)	7,314 dBi
7	1,176	107 MHz (3,438-3,545 GHz)	6,880 dBi	15	1,177	107 MHz (3,443-3,550 GHz)	7,314 dBi
8	1,185	106 MHz (3,438-3,544 GHz)	6,812 dBi	16	1,162	106 MHz (3,444-3,550 GHz)	6,899 dBi

Dalam sistem MIMO, pengaturan jarak antar elemen perlu dilakukan agar mendapatkan *mutual coupling* yang baik dari salah satu antena ke 15 antena yang lain. *Mutual coupling* yang perlu dicapai sesuai spesifikasi < -20 dB. Jarak antar elemen yang dipilih, yaitu 4,855 mm baik secara horizontal maupun vertikal.



Gambar 8. Grafik *mutual coupling* pada antena MIMO.

Gambar 8 simulasi dengan digunakan jarak antar elemen 42,855 mm pada perancangan MIMO 16 elemen 4x4, dihasilkan 225 grafik *mutual coupling*. Dimana data dari 225 grafik tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.7, Tabel 4.8, dan Tabel 4.9. Berdasarkan data tersebut, didapatkan nilai *mutual coupling* paling besar adalah -21,427 dB pada antena 6 terhadap antena 11 dan juga antena 11 terhadap antena 6. Sementara hasil paling minimal *mutual coupling* yang didapatkan adalah -48,304 dB yang hanya terjadi pada antena 16 terhadap antena 5. Dengan begitu, dapat disimpulkan bahwa pada perancangan antena MIMO 16 elemen 4x4 menggunakan metode *multilayer substrate* dengan *air gap*, serta digunakan jarak antar elemen 42,855 mm dapat dinyatakan memiliki *mutual coupling* yang baik di semua aspek pengaruh antar elemen antena.

5. Kesimpulan

Perancangan dan simulasi antenna MIMO 16 elemen pola 4×4 dengan menggunakan metode *multilayer substrate* dan *air gap*, didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Simulasi antenna MIMO 4×4 dirancang dari 16 elemen antenna tunggal *patch* sirkular menggunakan metode *multilayer substrate* dan *air gap*, sudah didapatkan sesuai spesifikasi yang ditentukan. Sehingga antenna yang dirancang sudah sesuai kebutuhan dari komunikasi 5G.
2. Penentuan *feed point* pencatutan, dilakukan pada perancangan antenna tunggal. Didapatkan *feed point* optimal pada sumbu $y = 5$ mm yang dihitung dari titik tengah *patch*. Berdasarkan skenario yang dilakukan, *feed point* yang lebih dekat dapat ditunjukkan hasil yang lebih optimal.
3. Antena tunggal dengan metode *multilayer substrate* dan *air gap*, didapatkan gain 6,131 dBi dan bandwidth 102 MHz.
4. Antena tunggal dengan metode *multilayer substrate* dan *air gap* yang dirancang pada sistem MIMO pola 4×4, ditunjukkan peningkatan pada gain dan bandwidth. Dimana didapatkan gain maksimal 7,314 dBi dan gain minimal 6,778 dBi. Sementara didapatkan bandwidth maksimal 107 MHz dan bandwidth minimal 104 MHz.

Daftar Pustaka:

- [1] A. Gupta and R. K. Jha, "A survey of 5g network: Architecture and emerging technologies," *IEEE access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [2] F. Febriyandi and I. Krisnadi, *Rekomendasi itu pada alokasi spektrum 5g di indonesia itu recommendation on 5g spectrum allocation in indonesia*. Universitas Indonesia, 2019.
- [3] E. Mohyeldin, "Minimum technical performance requirements for imt-2020 radio interface (s)," in *ITU-R Workshop on IMT-2020 Terrestrial Radio Interfaces*, 2016, pp. 1–12.
- [4] F. W. Ardianto, F. F. Lanang, S. Renaldy, and T. Yunita, "Design mimo antenna with u-slot rectangular patch array for 5g applications," in *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. IEEE, 2018, pp. 1–2.
- [5] M. Abdullah-Al-Mamun, S. Datto, and M. S. Rahman, "Performance analysis of rectangular, circular and elliptical shape microstrip patch antenna using coaxial probe feed," in *2017 2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [6] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, 2012.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [8] G. Kumar and K. P. Ray, *Broadband microstrip antennas*. Artech house, 2003.
- [9] G. Manjunath, K. Sadyojatha *et al.*, "Design and analysis of circular mpa using multilayer substrate sandwich for bandwidth enhancement," in *2017 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [10] S. S. Naik and G. Shet, "Design and simulation of conventional and u-slot circular microstrip patch antenna with and without air gap for lte application," in *2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. IEEE, 2018, pp. 126–131.
- [11] *Ansoft HFSS 15.0 training*. Microwave Laboratory Telkom University, 2019.
- [12] J. P. Maicas, *Recent Developments in Mobile Communications: A Multidisciplinary Approach*. BoD– Books on Demand, 2011.
- [13] J. C. Bansal, K. N. Das, A. Nagar, K. Deep, and A. K. Ojha, *Soft Computing for Problem Solving: SocProS 2017, Volume 1*. Springer, 2018, vol. 816.
- [14] K. Bangash, M. M. Ali, H. Maab, and H. Ahmed, "Design of a millimeter wave microstrip patch antenna and its array for 5g applications," in *2019 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.