

SISTEM ANTENA PEMANCAR MIMO (2X8) MENGGUNAKAN MULTI SUBSTRAT 3 LAYER DAN REFLEKTOR PADA FREKUENSI 3,5 GHz UNTUK KOMUNIKASI 5G

MIMO TRANSMITTER ANTENNA SYSTEM (2X8) USING 3 LAYERS MULTI SUBSTRATE AND REFLECTORS ON FREQUENCY 3.5 GHz FOR 5G COMMUNICATION

Emerson Gabariel Ambarita¹, Rina Pudji Astuti², Trasma Yunita³

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

¹emersonambarita@student.telkomuniversity.ac.id,

²rinapudjiastuti@telkomuniversity.co.id, ³trasmayunita@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi sistem komunikasi yang semakin meningkat setiap tahunnya memicu semakin tingginya permintaan kecepatan akses internet. Teknologi yang mampu memberikan layanan internet dengan kecepatan tinggi dan mencakup semua wilayah yaitu teknologi 5G (*fifth generation*). Teknologi 5G memiliki kelebihan seperti *data rate* yang tinggi, *bandwidth* yang lebar, mengurangi *latency*, meningkatkan kapasitas kanal dan lebih hemat energi. Antena yang digunakan dalam teknologi 5G menggunakan sistem MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Sistem MIMO berfungsi mengurangi pemantulan dan *scattering* gelombang serta untuk menaikkan kapasitas kanal dengan menggunakan lebih dari satu antena di penerima dan pengirim. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan antena *massive* MIMO di sisi pemancar dengan susunan 2x8 16 elemen yang menggunakan frekuensi 3,5 GHz. Bentuk *patch* yang dipilih yaitu bentuk *circular*. Bahan yang digunakan untuk lapisan substrat yaitu FR-4 dengan permitivitas dielektrik 4,3 dan ketebalan 1.6 mm serta bahan untuk lapisan *groundplane*, *patch* dan *feedline* yaitu tembaga (*copper*). Teknik pencatutan yang digunakan catuan *microstrip linefeed*. Metode yang digunakan dalam perancangan antena antara lain *multi* substrat 3 *layer* untuk meningkatkan *bandwidth* dan reflektor untuk meningkatkan *gain*. Hasil yang didapatkan adalah antena yang memiliki nilai VSWR $\leq 1,5$ dengan polarisasi unidireksional dengan *gain* $\geq 6,5$ dB, *bandwidth* ≥ 100 MHz dan mutual coupling ≤ 20 dB.

Kata kunci : antena, MIMO, 5G, *gain*, *bandwidth*, *mutual coupling*

Abstract

The development of technology communication system is increasing every year triggers the increasing high demand of speed internet access. The technology that can provide internet services at high speed and cover all the areas, namely 5G technology (*fifth generation*). 5G technology has the advantages such as high data rate, wide bandwidth, reducing latency, increasing channel capacity and more energy efficient. In this research done by designing the antenna MIMO at the transmitter side with the arrangement of the 2x8 16 elements using a frequency of 3.5 GHz. The shape of the patch using shape circular. The material chosen for the substrate layer that is FR-4 with dielectric permittivity 4.3 and thickness of 1.6 mm and the material for the layer groundplane, the patch and the feedline, i.e. copper (copper). Feeding techniques used ration microstrip linefeed. The methods used in the design of the antenna between the other multi-substrate 3 of the layer to improve the bandwidth and the reflector to increase the gain. The results obtained are an antenna that has a VSWR value of ≤ 1.5 with unidirectional polarity with a gain of ≥ 6.5 dB, bandwidth ≥ 100 MHz and mutual coupling ≤ 20 dB.

Keyword : antenna, MIMO, 5G, *gain*, *bandwidth*, *mutual coupling*

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi sistem komunikasi yang semakin pesat memicu semakin tingginya permintaan akan kecepatan akses internet. Salah satu teknologi yang mampu memberikan layanan internet dengan kecepatan tinggi yaitu 5G(*fifth generation*). Teknologi 5G memiliki kelebihan seperti data *rate* yang tinggi, *bandwidth* yang lebar, mengurangi *latency*, meningkatkan kapasitas kanal dan lebih hemat energi[1]. Frekuensi kerja yang digunakan di Indonesia yang ditetapkan oleh KEMKOMINFO (Kementerian Komunikasi dan Informatika) adalah 3.5 GHz.[2] Sistem MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) berguna untuk meningkatkan kapasitas kanal dengan penggunaan antena yang lebih dari satu di sisi pengirim dan sisi penerima. [3]

Pada Tugas Akhir ini dibahas mengenai pengujian antena MIMO di sisi pemancar dengan pola 2x8 16 elemen dengan bentuk *patch* sirkular karena menghasilkan *bandwidth* yang lebih besar dibandingkan menggunakan *patch rectangular*[4]. Bahan yang dipilih untuk lapisan substrat yaitu FR-4 dengan permitivitas dielektrik 4.3 dan ketebalan 1.6mm serta bahan untuk lapisan *groundplane*, *patch* dan *feedline* yaitu tembaga (*copper*). Teknik pencatupannya menggunakan catuan *microstrip linefeed*. Penambahan beberapa metode atau teknik pada perancangan antena seperti *multi* substrat 3 layer dapat melebarkan *bandwidth* dan reflektor untuk mengurangi *back lobe* dan meningkatkan gain.[5][6] Antena yang dirancang diharapkan dapat menghasilkan antena yang memiliki nilai VSWR ≤ 1.5 dengan polarisasi unidireksional dengan *gain* ≥ 6.5 dB, *bandwidth* ≥ 100 MHz dan mutual coupling ≤ -20 dB.

2. Dasar Teori

2.1 Teknologi 5G

Teknologi generasi kelima (5G) di Indonesia masih dalam pengembangan lebih lanjut. Persyaratan minimum yang akan digunakan dalam generasi kelima 5G masih belum bisa ditentukan dan para peneliti di bidang telekomunikasi masih melakukan penelitian lebih lanjut. Berdasarkan laporan dari ITU-R M.2410-0 mengenai *minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*, bahwa spesifikasi generasi kelima (5G) yaitu:[7]

Tabel 1. Spesifikasi Minimum 5G[7]

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	

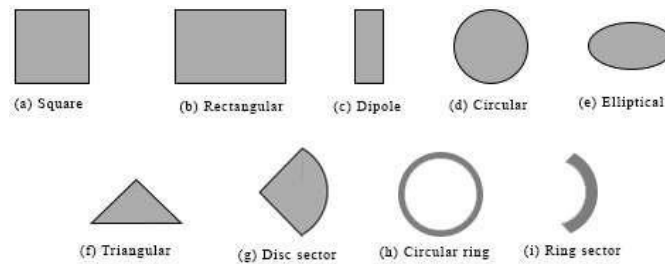
2.2 Antena Mikrostrip

Antena adalah sebuah perangkat pasif yang mengubah sinyal EM dari saluran transmisi menjadi sinyal radiasi gelombang EM dalam ruang bebas. Antena mikrostrip adalah salah satu jenis antena yang berbentuk seperti potongan berukuran kecil dan tipis. Secara umum, antena mikrostrip terdiri dari tiga komponen penyusun, yaitu *patch*, substrat, dan *groundplane* seperti pada gambar dibawah ini[3]



Gambar 1. Lapisan Antena Mikrostrip[3]

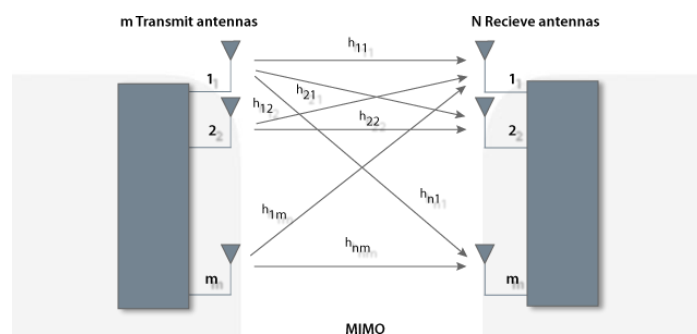
Bentuk *patch* antenna terdiri dari persegi, persegi panjang, strip tipis (*dipole*), melingkar, *elips*, segitiga, sirkular atau konfigurasi lainnya seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. Bentuk *Patch* Antena[3]

2.3 MIMO

MIMO adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa antenna di pengirim (Tx) maupun di penerima (Rx). MIMO $M \times N$ memiliki arti yaitu jumlah antenna di pengirim sebanyak M dan jumlah antenna di penerima sebanyak N . Pada penelitian Tugas Akhir ini akan dilakukan perancangan sistem antenna MIMO dengan susunan 2×8 yang menandakan 16 antenna di pengirim dan 16 antenna di penerima[8]. Sistem MIMO biasanya digunakan dalam komunikasi seluler dan diharapkan dapat digunakan untuk teknologi 5G. Hal ini dikarenakan MIMO dapat mengurangi terjadinya *multipath fading*, di mana *fading* tersebut bisa terjadi karena sinyal merambat melalui rute-rute yang berbeda serta mengalami pemantulan maupun *blocking* oleh *obstacle* yang dilalui[9]. Berikut merupakan arsitektur MIMO



Gambar 3. Arsitektur MIMO

2.4 Gain

Gain merupakan perbandingan antara intensitas daya pancar maksimum dengan intensitas daya pancar yang didapatkan antenna diradiasi dengan antenna referensi. *Gain* memiliki hubungan terhadap direktivitas, dimana direktivitas hanya memperhitungkan keterarahan suatu radiasi antenna sementara *gain* melihat efisiensi dari antenna tersebut.[3] Pola radiasi dengan nilai *gain* yang lebih rendah bersifat melebar sehingga energi yang dipancarkan terdistribusi luas secara *sectoral* (sudut). Sedangkan antenna dengan nilai *gain* yang lebih besar akan memiliki pola pancar yang sempit, energi dipancarkan tidak melebar, tetapi pada arah pancaran utamanya atau *main lobenya*, energi dapat menjangkau wilayah yang lebih jauh.[10]

2.5 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

VSWR merupakan perbandingan antara amplitudo gelombang berdiri (*standing wave*) maksimum dengan minimum. Kondisi efisien suatu antenna ketika VSWR bernilai 1 yang berarti tidak ada refleksi atau pantulan ketika saluran dalam keadaan *matching* sempurna, namun pada kondisi ini sulit untuk didapatkan. Semakin kecil nilai VSWR maka semakin kecil gelombang yang dipantulkan dan *matching impedance* sebaliknya jika semakin besar nilai VSWR maka semakin besar gelombang yang dipantulkan dan tidak *matching impedance*. Pada umumnya nilai VSWR yang dianggap baik adalah $VSWR \leq 1.5$. Pada penelitian ini, nilai VSWR yang diharapkan adalah kurang dari 1.5.[11]

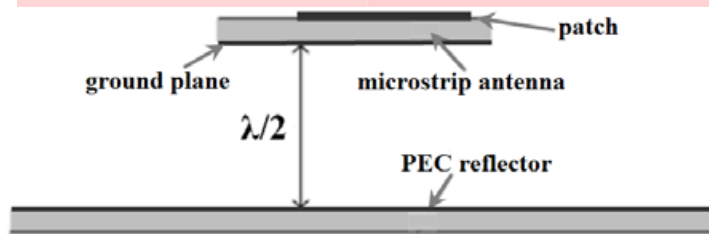
2.6 Bandwidth

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 3 GHz - 4 GHz dengan nilai frekuensi *center*-nya pada frekuensi 3.5 GHz.[12]

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 dapat diartikan sebagai lebar bidang frekuensi untuk VSWR atau *return loss* dibawah suatu nilai tertentu.

2.7 Layer Reflektor

Reflektor antenna digunakan untuk memaksimalkan pengarahannya dan penguatan antenna (*gain*) mikrostrip. Sistem kerja *layer* reflektor yaitu mengubah pola radiasi yang dipantulkan kembali terhadap antenna atau *back lobe* menjadi *main lobe*. Terdapat berbagai bentuk reflektor salah satunya berbentuk datar (*flat sheet*) [13]. Reflektor ditempatkan dibelakang peradiasi antenna agar mengurangi *back lobe* sehingga dapat meningkatkan nilai *gain* antenna. Beberapa bahan yang digunakan dalam pembuatan *layer* reflektor yaitu besi, seng, *stainless*, tembaga dan aluminium. [6] Jarak antara reflektor dengan antenna yang didepannya bernilai dari $\lambda/8$ hingga $\lambda/2$ dengan interval $\lambda/8$. Ukuran dimensi reflektor bernilai 2 kali lebih besar dari antenna utama



Gambar 4 Antena Mikrostrip dengan reflektor

3. Perancangan

3.1 Desain Sistem

Pada penelitian ini merancangan antenna MIMO 2X8 16 elemen dengan spesifikasi minimum yang harus dicapai sebagai berikut

Tabel 2. Spesifikasi Perancangan

PARAMETER	NILAI
Frekuensi Kerja	3,5 GHz
<i>Bandwidth</i>	$\geq 100\text{MHz}$
VSWR	$\leq 1,5$
<i>Gain</i>	$\geq 6,5\text{dBi}$
<i>Mutual Coupling</i>	$\leq -20\text{dB}$
Pola Radiasi	Unidireksional

Tugas akhir ini merancangan antenna MIMO di sisi pemancar dengan susunan 2x8 berjumlah 16 elemen. Bentuk *patch* yang digunakan adalah *patch* sirkular dan menggunakan pencatutan mikrostrip *feedline*. Spesifikasi lapisan substrat menggunakan bahan FR-4 dengan permitivitas relatifnya 4,3. Bagian *patch*, bagian *feedline* dan lapisan *ground plane* menggunakan bahan tembaga (*copper*) yang memiliki permitivitas relatif 1 dan ketebalan 0,035. Penentuan dimensi antenna menggunakan rumus yang tertera menghasilkan dimensi antenna sebagai berikut.

Tabel 3. Dimensi Antena Tunggal *Patch* Sirkular

Variabel	Ukuran Dimensi	Deskripsi
t	0,035	Tebal Konduktor
h	1,6 mm	Tebal Dielektrik
Wg	34,06 mm	Lebar <i>Groundplane</i>
Wf	3,105 mm	Lebar <i>feed</i>
Lf	11,18 mm	Panjang <i>feed</i>
Lg	40,44 mm	Panjang <i>Groundplane</i>
a	12,23 mm	Jari-Jari <i>Patch</i>
d	43 mm	Jarak Antar Elemen

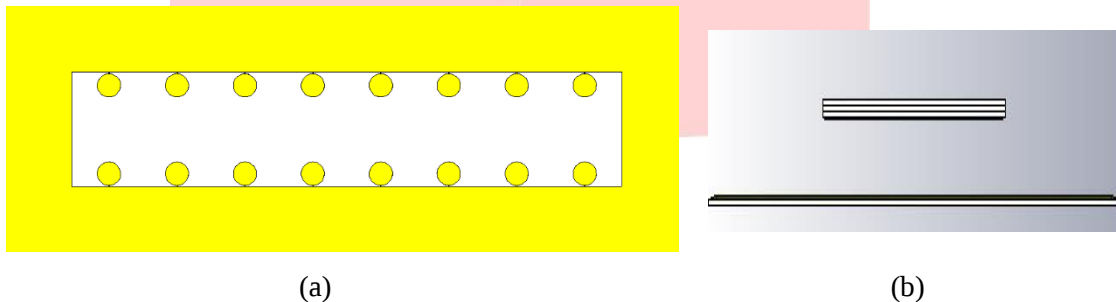
Pada perancangan antenna MIMO tersebut menggunakan beberapa metode agar dapat mencapai nilai spesifikasi minimum yaitu metode *multilayer* substrat dengan 3 lapis untuk memperlebar *bandwidth* dan

metode *layer* reflektor. Pada *layer* reflektor ukuran 2 kali lebih besar dari antenna utama dengan diletakan dibelakang antenna utama. Jarak antara reflektor dengan antenna yang didepan nya bernilai dari $\lambda/8$ hingga $\lambda/2$ dengan interval $\lambda/8$. berikut merupakan nilai dari jarak dan ukuran dimensi reflektor

Tabel 4. Ukuran dan Jarak Reflektor

No	Parameter	Dimensi Antena (mm)	
		Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi
1	Jarak Reflektor	10.75	21.5
2	Panjang Reflektor(l_{ref})	92	200
3	Lebar Reflektor(w_{ref})	132	200

Berikut merupakan desain antenna MIMO 2X8 16 elemen metode *multilayer* substrat 3 lapis dan reflektor .

Gambar 5 Antena MIMO 2X8 *Multi* substrat 3 *layer* dan reflektor. (a) Tampak Depan (b) Tampak Samping

4. Analisis Hasil Simulasi

4.1 Analisis Antena Tunggal

Pada tahapan awal perancangan antenna MIMO 2x8 tersebut, antenna tunggal tanpa metode dirancang guna membandingkan hasil perhitungan dengan simulasi. Hasil yang didapatkan pada antenna tunggal *patch* sirkular bernilai pada tabel 5 dikarenakan hasil yang didapatkan tidak sesuai dengan tabel 2 maka dilakukan penambahan metode yaitu *multi* substrat 3 *layer* .Hasil yang didapatkan terdapat pada tabel 5 dibawah ini.

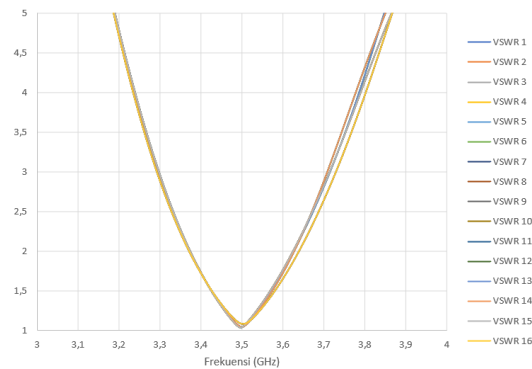
Tabel 5. Perbandingan Hasil Antena setelah simulasi

Parameter	Nilai(sesudah Optimasi)	
	Sirkular	<i>Multi</i> Substrat 3 <i>Layer</i>
VSWR	1,050	1,207
<i>Bandwidth</i>	79,5 MHz	102,6 MHz
<i>Gain</i>	2,779 dB	4,472 dB
Polaradiasi	Unidireksional	Unidireksional

Berdasarkan tabel 5 hasil yang didapatkan memenuhi salah satu spesifikasi yaitu *bandwidth* dari 79,5 MHz menjadi 102,6 MHz dimana spesifikasi minimum bernilai ≥ 100 MHz dan juga memberikan kenaikan pada nilai *gain* .Dengan begitu metode *multi* substrat 3 *layer* memberikan pengaruh kenaikan yang signifikan terhadap nilai VSWR, *gain*, dan *bandwidth* . Metode tersebut akan digunakan untuk perancangan antenna selanjutnya yaitu antenna pemancar MIMO 2X8 16 elemen sehingga dapat mencapai tujuan akhir dari penelitian ini.

4.2 Analisis Antena MIMO 2X8 *Multi* substrat 3 *layer* dan reflektor

Antena tunggal merupakan dasar untuk melanjutkan perancangan antenna MIMO 2x8 16 elemen. Pada perancangan antenna tersebut menggunakan metode *multi* substrat 3 *layer* dikarenakan untuk memperlebar *bandwidth* dan metode reflektor untuk memperbesar nilai *gain*. Berikut merupakan hasil simulasi antenna tersebut



Gambar 6. Grafik VSWR Antena MIMO 2x8

Berdasarkan gambar 4 diatas dapat menyatakan bahwa antena MIMO 2x8 16 elemen dengan metode multi substrat 3 layer dan reflektor menghasilkan nilai VSWR terkecil 1,042 dan terbesar 1,085. Hasil tersebut sudah memenuhi spesifikasi perancangan yaitu $VSWR \leq 1,5$. berikut merupakan nilai *bandwidth* masing masing elemen.

Tabel 6. Rincian VSWR Dan Bandwidth

Antena	Nilai		Antena	Nilai	
	VSWR	Bandwidth(MHz)		VSWR	Bandwidth(MHz)
1	1,085	153,7	9	1,085	153,7
2	1,045	143,2	10	1,045	143,2
3	1,042	147,8	11	1,046	144,8
4	1,042	147,8	12	1,042	147,8
5	1,042	147,8	13	1,042	147,8
6	1,046	144,8	14	1,046	144,8
7	1,045	143,2	15	1,045	143,2
8	1,085	154,2	16	1,085	154,2

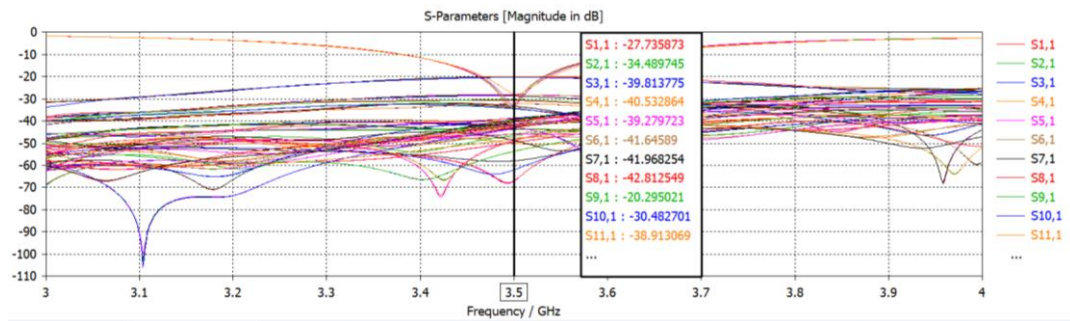
Pada tabel 6 dijelaskan bahwa bandwidth yang dihasilkan terkecil 143,2 MHz dan terbesar 154,2 MHz. Metode multilayer substrat dan reflektor memiliki pengaruh terhadap kenaikan nilai *bandwidth* sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk parameter *bandwidth* sudah memenuhi spesifikasi yaitu ≥ 100 MHz.

Nilai *gain* dan polaradiasi yang dihasilkan dari antena MIMO 2X8 dengan metode multilayer substrat 3 layer dan reflektor terdapat pada tabel dibawah ini.

Tabel 7. Rincian Gain dan Polaradiasi Antena MIMO 2X8

Antena	Nilai		Antena	Nilai	
	Gain (dBi)	Pola Radiasi		Gain (dBi)	Pola Radiasi
1	7,148	unidireksional	9	7,148	unidireksional
2	6,520	unidireksional	10	6,520	unidireksional
3	6,563	unidireksional	11	6,563	unidireksional
4	6,583	unidireksional	12	6,583	unidireksional
5	6,583	unidireksional	13	6,583	unidireksional
6	6,563	unidireksional	14	6,563	unidireksional
7	6,520	unidireksional	15	6,519	unidireksional
8	7,148	unidireksional	16	7,148	unidireksional

Berdasarkan tabel 7 yang menyatakan bahwa nilai *gain* terkecil bernilai 6,519 dBi dan nilai gain terbesar 7,148 dBi dengan masing masing elemen memiliki pola radiasi unidireksional. Metode multilayer substrat 3 lapis dan reflektor meningkatkan nilai *gain* oleh sebab itu dapat disimpulkan bahwa perancangan antena MIMO 2X8 dengan metode tersebut sudah memenuhi spesifikasi yaitu $\geq 6,5$ dBi.



Gambar 7. Grafik Mutual Coupling Antena MIMO 2x8

Pada perancangan antenna MIMO 2x8 yang berjumlah 16 elemen ,masing masing elemen akan mengalami efek mutual coupling dimana efek tersebut dapat mengurangi kinerja antenna yang dirancang,Sehingga untuk mengatasi efek mutual coupling tersebut diberi jarak antar elemen *patch* antenna. Pada perancangan antenna MIMO 2X8 dengan 16 elemen diberi jarak sebesar $\lambda/2$ dan jarak tersebut dioptimisasi menjadi 62,5 mm.

Berdasarkan gambar 5 nilai mutual coupling terbesar yaitu -20,29 db dan yang terkecil bernilai -67,11 dB oleh sebab itu nilai mutual coupling tersebut sudah melebihi nilai minimum untuk mutual coupling yaitu ≤ -20 dB .

Dengan begitu dapat disimpulkan bahwa antenna MIMO 2x8 dengan 16 elemen dengan masing masing elemen sudah *independent* atau dengan kata lain masing masing elemen sudah tidak mempengaruhi elemen lainnya.

4.3 Rencana Aplikasi 5G

Perancangan antenna pemancar MIMO 2x8 dengan 16 elemen dengan menggunakan metode *multi* substrat 3 layer dan reflektor pada frekuensi 3,5 GHz menghasilkan nilai *bandwidth* terkecil yaitu 143,2 MHz dan maksimum bernilai 153,7 MHz. Hasil VSWR tiap antenna yang dihasilkan dari 1,042 hingga 1,085.Hasil *gain* tiap antenna yang dihasilkan dari 6,519 dBi hingga 7,148 dBi dengan pola radiasi unidireksional. Nilai *mutual coupling* yang dihasilkan sudah bernilai lebih dari -20 dB dengan kata lain tiap antenna sudah *independent* dan tidak mempengaruhi satu sama lainnya.

Berdasarkan hasil dari simulasi antenna tersebut sudah memenuhi salah satu spesifikasi 5G yaitu *bandwidth* ≥ 100 MHz.Pada perhitungan *link budget* nilai *gain* yang digunakan yaitu 6,5 dBi dengan nilai *fading margin* 47,71 dB atau lebih besar dari 40 dB .Berdasarkan nilai *fading margin* tersebut tingkat *availability* yang digunakan mencapai 99,99 % yang artinya tingkat ketersediaan dan kehandalan suatu sistem hampir mencapai 100 % .

Sehingga dapat disimpulkan perancangan antenna pemancar MIMO 2x8 16 elemen dengan metode *multilayer* substrat 3 lapis dan reflektor sudah dapat digunakan dalam komunikasi 5G.

5. Kesimpulan

1. Antena pemancar MIMO dengan susunan 2X8 16 elemen menggunakan metode *multi* substrat 3 layer dan reflektor menghasilkan VSWR dari 1,042 hingga 1,085 dengan *bandwidth* minimum 143,2 MHz hingga 153,7 MHz, nilai *gain* dari 6,519 dB hingga 7,148 dB dan pola radiasi unidireksional untuk masing masing elemen.
2. Parameter yang diperoleh berdasarkan simulasi antenna MIMO 2x8 dengan metode *multi* substrat 3 layer dan reflektor sudah sesuai dengan spesifikasi antenna yang diinginkan.
3. Penambahan metode *multi* substrat 3 layer pada antenna MIMO 2X8 16 elemen dapat memperlebar *bandwidth* masing masing elemen dengan nilai minimum 134,1 MHz dan maksimum 137,4 MHz.
4. Antena pemancar MIMO 2X8 *multi* substrat 3 layer yang dimodifikasi dengan ditambahkan reflektor dibelakang antenna dapat meningkatkan *gain* hingga dari 5,123 dB hingga 7,148 dB.
5. Nilai *mutual coupling* masing masing antenna pada antenna MIMO 2x8 dengan metode *multi* substrat 3 layer dan reflektor 16 elemen sudah lebih kecil dari -20 dB.

References

- [1] S. Wibawa, D. Ir, and I. Krisnadi, "Teknologi 5G: Kajian Awal, Dalam Hubungan Regulasi Dan Hukum Di Indonesia," 2018.
- [2] T. Peneliti and P. Sdppi, *Studi Lanjutan 5G Indonesia 2018 Spektrum Outlook dan Use Case untuk Layanan 5G Indonesia*. 2018.
- [3] C. BALANIS, "ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN," 2016.
- [4] F. W. Ardianto, N. M. Adriansyah, and B. Syihabuddin, "MENGGUNAKAN PATCH CIRCULAR DAN PATCH RECTANGULAR DENGAN SLOTTED-PATCH UNTUK AKSES RADIO 5G FREKUENSI 15 GHZ DESIGN AND ANALYSIS MIMO 8×8 ARRAY USING PATCH CIRCULAR AND PATCH RECTANGULAR WITH SLOTTED-PATCH ANTENNA FOR RADIO ACCESS 5G FREQUENCY 15 GHZ."
- [5] G. Manjunath, Naseeruddin, and K. M. Sadyojatha, "Design and analysis of circular MPA using multi-layer substrate sandwich for bandwidth enhancement," *2017 Int. Conf. Inf. Commun. Embed. Syst. ICICES 2017*, no. Icices, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/ICICES.2017.8070774.
- [6] A. D, "Analisa efisiensi antena dipole ditinjau dari penggunaan bahan reflektor," no. 2. pp. 47–51, 2011.
- [7] 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.
- [8] E. Bjornson, L. Sanguinetti, and M. Debbah, "Massive MIMO with imperfect channel covariance information," *Conf. Rec. - Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput.*, vol. 11, no. 3, pp. 974–978, 2017, doi: 10.1109/ACSSC.2016.7869195.
- [9] K. J. A. S, L. O. Nur, and B. Syihabuddin, "Perancangan Dan Realisasi Antena Mimo 4×4 Array Rectangular Patch Dengan U-Slot Untuk Aplikasi 15 Ghz Design and Realization Mimo 4×4 Array Rectangular Patch Antenna With U-Slot for 15 Ghz Application."
- [10] R. Hussain, A. T. Alreshaid, S. K. Podilchak, and M. S. Sharawi, "Compact 4G MIMO antenna integrated with a 5G array for current and future mobile handsets," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 11, no. 2, pp. 271–279, 2017, doi: 10.1049/iet-map.2016.0738.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.