

ANTENA MIMO 4x2 SUSUNAN 2 ELEMEN MIKROSTRIP PATCH SIRKULAR 3,5 GHZ UNTUK BTS 5G

MIMO 4x2 OF CIRCULAR PATCH MICROSTRIP ANTENNA ARRAY 3,5 GHZ FOR BTS 5G

Wahyu Ananda Sabilla Pradina¹, Heroe Wijanto², Trasma Yunita³
1,3Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
1sabillaanandaa@telkomuniversity.ac.id, 2heroe@telkomuniversity.co.id,
3trasmayunita@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Kebutuhan pada komunikasi nirkabel yang semakin pesat mengakibatkan pengembangan komunikasi nirkabel mengarah pada komunikasi 5G. Saat ini, komunikasi 5G memiliki rentang frekuensi yang terbatas. Di Asia, frekuensi 3,5 GHz sebagai kandidat frekuensi yang disarankan masih digunakan oleh komunikasi satelit. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem untuk mengatasi masalah tersebut.

Penelitian ini berfokus pada perancangan dan simulasi antena MIMO 4x2 susunan 2 elemen *patch* sirkular yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz. Bahan yang digunakan untuk substrat adalah FR-4 dengan konstanta dielektrik 4,3 dan ketebalan bahan 1,6 mm.

Antena yang dirancang disesuaikan dengan spesifikasi yang dibutuhkan untuk komunikasi 5G. Berdasarkan simulasi pada Tugas Akhir ini didapatkan bahwa antena MIMO 4x2 susunan 2 elemen *patch* sirkular memiliki nilai VSWR 1,15 pada frekuensi kerja 3,5 GHz untuk masing-masing antena. *Bandwidth* yang dihasilkan memiliki lebar paling sempit sebesar 211,4 MHz pada antena keempat dan paling lebar sebesar 214,3 MHz pada antena kedua. Sedangkan untuk nilai *mutual coupling* tertinggi sebesar -41,126 dB. Serta *gain* yang dihasilkan adalah 6,784 dB dan 6,906 dB dengan pola radiasi unidireksional.

Kata kunci : antena, MIMO, susunan, 5G

Abstract

The need for wireless communication is increasing rapidly resulting in the development of wireless communication is directed to 5G communication technology. However, 5G communication has a limited frequency range. In Asia, 3.5 GHz as the recommended frequency candidate are still used by satellite communications. So we need a system to overcome these problems.

This final project focuses on the design of MIMO 4x2 of circular patch microstrip antenna array that operates at 3.5 GHz frequency. The substrate used is FR-4 with dielectric constant 4.4 and thickness 1.6.

The antennas are adjusted to the specifications needed to optimize the work of 5G. Based on simulation of this undergraduated thesis, the results of MIMO 4x2 of 2 circular patch microstrip antenna array has VSWR 1,15 at frequency 3.5 GHz for each antenna. The resulting bandwidth has the narrowest bandwidth of 211.4 MHz on the fourth antenna and the widest at 214.3 MHz on the second antenna. While the highest mutual coupling value of -41,126 dB. And the resulting gain is 6,784 dB and 6,906 dB with a unidirectional radiation pattern.

Keywords: antenna, MIMO, array, 5G

1. Pendahuluan

Pengembangan teknologi komunikasi membawa dampak besar bagi kehidupan masyarakat. Semakin tingginya tuntutan untuk komunikasi nirkabel mengakibatkan pengembangan komunikasi nirkabel mulai diarahkan ke teknologi komunikasi 5G. Teknologi komunikasi 5G memiliki *data rate* yang tinggi, nilai *latency* hingga kurang dari 1 ms, juga *bandwidth* yang lebih besar sehingga mampu mengatasi permintaan para pengguna teknologi komunikasi nirkabel[1].

Komunikasi 5G memiliki tiga kategori spektrum frekuensi yang akan digunakan. Kategori spektrum frekuensi yang dapat digunakan, yaitu dibawah 1 GHz, 1–6 GHz dan diatas 6 GHz. Pada frekuensi 1-6 GHz terdapat kandidat frekuensi yang dapat digunakan untuk mengembangkan

teknologi komunikasi 5G, yaitu frekuensi 3,3 – 4,2 GHz. *The World Radiocommunication Conference (WRC)* menyatakan bahwa frekuensi ideal yang dapat diterapkan untuk wilayah Asia ada pada frekuensi 3.5 GHz[2].

Pengembangan teknologi komunikasi 5G membutuhkan antena yang tepat yang mampu untuk mendukung sistem komunikasi 5G. Penggunaan sistem *Multiple In Multiple Out (MIMO)* pilihan yang tepat untuk pengembangan teknologi 5G. [3]. Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan antena MIMO 4x2 susunan 2 elemen dengan *patch* sirkular yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz. Perancangan antena secara susunan dipilih untuk meningkatkan *gain* antena. Selain itu, pemilihan bentuk *patch* sirkular dilakukan untuk memperoleh *bandwidth* yang lebih lebar daripada *patch* persegi panjang.

2. Dasar Teori

2.1. Generasi Kelima (5G)

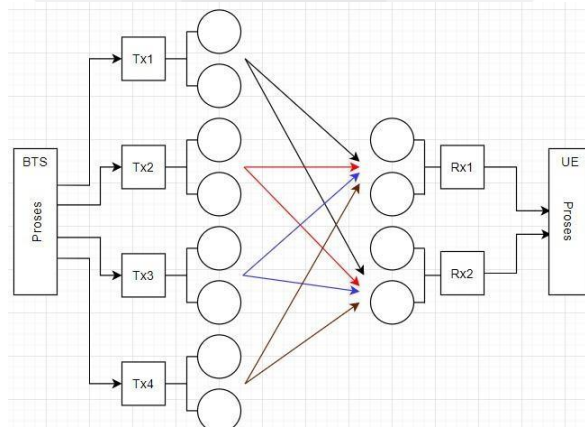
Teknologi komunikasi generasi kelima (5G) merupakan pengembangan dan penyempurnaan dari teknologi komunikasi sebelumnya. Pengembangan teknologi 5G masih terus dilakukan agar dapat memenuhi syarat untuk menerapkan teknologi 5G. Teknologi 5G diharapkan dapat memberikan keuntungan lebih seperti kapasitas sistem yang lebih tinggi, *latency* yang jauh lebih rendah, layanan dalam hal kecepatan konektivitas untuk mendukung penggunaan perangkat *Internet of Things (IoT)*. *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R)* mengusulkan bahwa komunikasi 5G harus memenuhi spesifikasi minimum seperti yang tertulis pada Tabel 2.1 agar dapat bekerja optimal[4].

Tabel 2.1 Spesifikasi 5G [4]

No.	Parameter	Value	
		Downlink	Uplink
1.	<i>Peak data rate</i>	20 Gbps	10 Gbps
2.	<i>Peak spectral efficiency</i>	30 bps/Hz	15 bps/Hz
3.	<i>User experienced data rate</i>	100 Mbps	50 Mbps
4.	<i>Indoor Hotspot - eMBB</i>	0,3 bps/Hz	0,21 bps/Hz
5.	<i>Dense Urban - eMBB</i>	0,225 bps/Hz	0,15 bps/Hz
6.	<i>Rural - eMBB</i>	0,12 bps/Hz	0,045 bps/Hz
7.	<i>Connection Density</i>	1.000.000 per km ²	
8.	<i>Bandwidth</i>	≥ 100 MHz	

2.2. MIMO

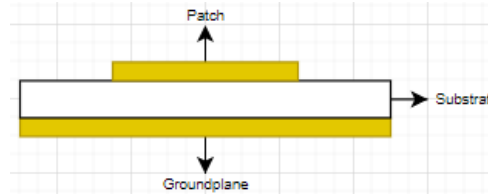
Multiple Input Multiple Output (MIMO) merupakan suatu sistem yang menggunakan lebih dari satu antena baik dari sisi pengirim maupun penerima. Pada penelitian ini antena MIMO yang dirancang adalah antena MIMO 4x2. Gambar 2.1 menunjukkan sistem MIMO 4x2 untuk komunikasi 5G. Jumlah antena yang ada pada sisi BTS berjumlah 4 antena dengan susunan 2 elemen *patch* sirkular. Sedangkan pada jumlah antena pada sisi *user equipment* berjumlah 2 antena.



Gambar 2.1 Arsitektur Antena MIMO 4x2 Susunan 2 Elemen

Dalam penyusunan antenna MIMO, jarak antar-antena yang akan dipasang perlu diperhatikan. Hal ini dilakukan untuk meminimalisis terjadinya isolasi dan *mutual coupling* yang terjadi akibat letak antenna yang saling berdekatan satu dengan lainnya, sehingga mempengaruhi performansi antenna tersebut.

2.3. Antena Mikrostrip



Gambar 2.2 Antena Mikrostrip

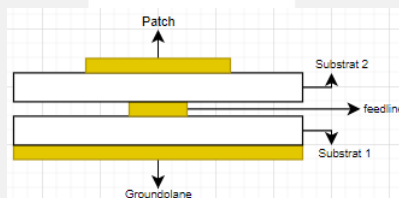
Antena mikrostrip merupakan antenna yang terbuat dari lempengan konduktor tipis yang ditumpuk dengan konduktor tipis lainnya yang dipisahkan oleh substrat yang terbuat dari bahan dielektrik. Antena mikrostrip memiliki 3 bagian utama yaitu *groundplane*, substrat dan *patch*. *Groundplane* terbuat dari bahan konduktor dan berperan sebagai *reflector*. Substrat merupakan lapisan dielektrik yang memisahkan *groundplane* dengan *patch*. *Patch* antenna mikrostrip terbuat dari bahan konduktor yang berfungsi untuk meradiasikan gelombang elektromagnetik. Salah satu bentuk *patch* yang sering digunakan *patch* sirkular yang akan digunakan untuk perancangan pada penelitian ini. Untuk menghitung dimensi *patch* sirkular dapat menggunakan persamaan (2.3) dengan terlebih dahulu menghitung persamaan (2.1) dan (2.2) dimana f_r adalah frekuensi resonansi dan ϵ_r adalah konstanta dielektik dari substrat antenna[5].

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (2.2)$$

$$a = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln\left(\frac{\pi a}{2h}\right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

2.4. Teknik Pencatuan



Gambar 2.3 Teknik Pencatuan Proximity Coupled

Teknik pencatuan antenna mikrostrip terdapat beberapa macam, diantaranya yaitu *microstrip line*, *proximity coupled*, *coaxial probe* dan *aperture coupled*. *Microstrip feedline* merupakan teknik pencatuan yang umum digunakan. Selain itu, terdapat teknik pencatuan dengan *proximity coupled*, teknik pencatuan dengan *proximity coupled* menggunakan dua lapis substrat dengan *microstrip feedline* terletak diantara kedua substrat tersebut. Teknik pencatuan dengan *proximity coupled* digunakan karena teknik pencatuan ini memberikan nilai *bandwidth* yang lebih lebar dibandingkan dengan *microstrip feedline* [6]. Untuk menghitung lebar catuan (w_f) dari antenna mikrostrip dapat menggunakan persamaan(2.4) dengan terlebih dahulu menghitung persamaan (2.5). Untuk menghitung panjang catuan (l_f) dari antenna mikrostrip dapat menggunakan persamaan (2.6) dengan terlebih dahulu menghitung persamaan (2.7) dan (2.8)

$$w = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r^{-1}}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.4)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.5)$$

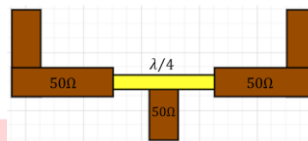
$$l_f = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.6)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon + 1}{2} + \frac{\epsilon - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{wf}\right)^{-1/2} \tag{2.7}$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{2.8}$$

2.5. Antena Susunan

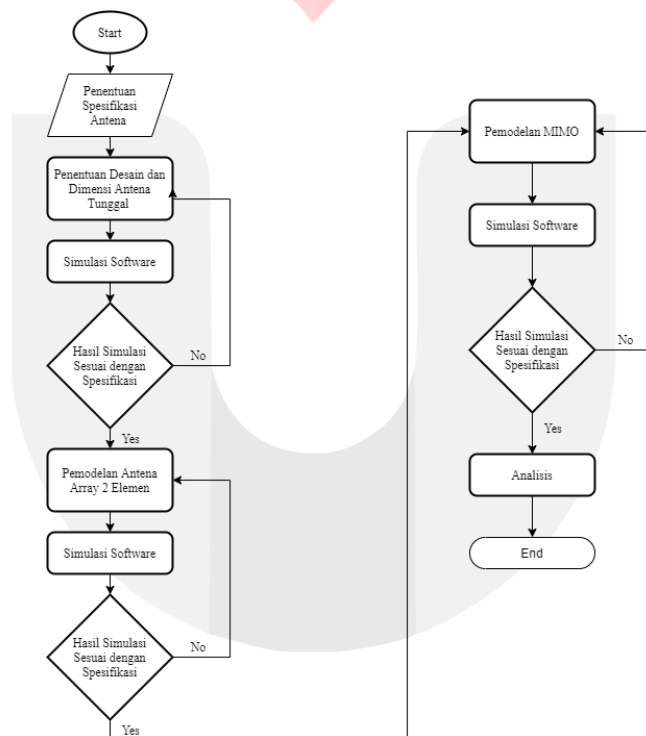
Perancangan antena mikrostrip tidak hanya dapat dirancang secara satu elemen, namun juga dapat dirancang secara susunan. Antena susunan (*array*) merupakan perancangan antena dengan menyusun beberapa antena yang identik dengan susunan tertentu. Dalam perancangan antena susunan, salah satu faktor yang perlu diperhatikan adalah jarak antar elemen antena yang bernilai $1/2\lambda$. Selain itu, diperlukan saluran yang terbagi ke masing-masing *patch* antena. Pada penelitian ini, akan digunakan transformator $\frac{\lambda}{4}$ sebagai *T-junction* sebagai pembagi seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.4 *T-junction* $\frac{\lambda}{4}$

3. Perancangan Sistem Antena

3.1. Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir Perancangan

Sebelum melakukan perancangan, dilakukan penentuan spesifikasi dan desain antena yang akan dirancang. Selanjutnya, perancangan dilakukan dengan menggunakan *software* setelah dilakukan perhitungan untuk menentukan dimensi antena. Perancangan antena dilakukan secara bertahap, dimulai dari perancangan antena *single element*, kemudian dilanjutkan dengan perancangan antena susunan 2 elemen *patch* sirular. Desain antena yang dibuat kemudian disimulasikan dan dilakukan optimasi untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Kemudian, jika hasil simulasi setelah dilakukan optimasi belum sesuai dengan

spesifikasi, maka perlu ditambahkan penggunaan metode untuk memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Dalam penelitian ini, metode yang dipilih adalah teknik pencatutan *proximity coupled* untuk memperlebar *bandwidth* antenna. Setelah seluruh parameter terpenuhi, maka dilakukan analisis terkait dengan parameter yang diuji, yaitu VSWR, frekuensi kerja, *bandwidth*, *gain* serta pola radiasi antenna.

Perancangan antenna MIMO 4x2 dilakukan setelah antenna susunan 2 elemen *patch* sirkular sudah memenuhi spesifikasi. Sehingga dapat digandakan untuk dirancangan sebagai antenna MIMO 4x2 susunan 2 elemen *patch* sirkular.

3.2. Spesifikasi Antena

Penelitian Tugas Akhir ini bertujuan untuk membuat antenna *microstrip* yang dapat diaplikasikan untuk BTS 5G. Penentuan spesifikasi antenna dilakukan sebelum memulai perancangan dan simulasi pada Tugas Akhir ini. Berikut merupakan spesifikasi antenna yang akan dirancang:

Tabel 3.1 Spesifikasi Antena

Spesifikasi	Deskripsi
Frekuensi Kerja	3,5 GHz
<i>Gain</i>	≥ 6.5 dB
<i>Bandwidth</i>	≥ 100 MHz
VSWR	$\leq 1,5$
Polaradiasi	Unidireksional

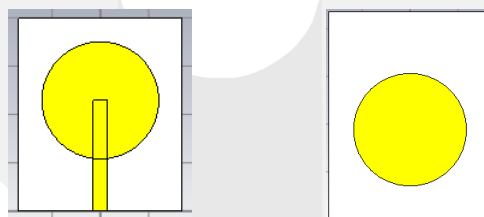
3.3. Pemilihan Bahan *Groundplane*, Substrat dan *Patch* Antena

Bahan yang digunakan untuk pembuatan *groundplane*, *patch* dan *feedline* pada perancangan antenna *microstrip* adalah tembaga (*copper*) yang memiliki ketebalan 0,035 mm dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) =1. Sedangkan untuk substrat akan digunakan bahan dielektrik FR-4 yang memiliki ketebalan 1,6 mm dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) =4,3.

3.4. Perancangan Desain Antena

3.4.1. Desain Antena *Single Element*

Dalam penelitian ini, antenna yang dibuat berbentuk *patch* sirkular. Penentuan dimensi antenna yang dibuat didapatkan berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan pada dasar. Perancangan pertama antenna *single element* dilakukan dengan menggunakan teknik pencatutan *microstrip line feed* dan *proximity coupled*. Desain antenna *single element* dapat dilihat pada Gambar 3.2.



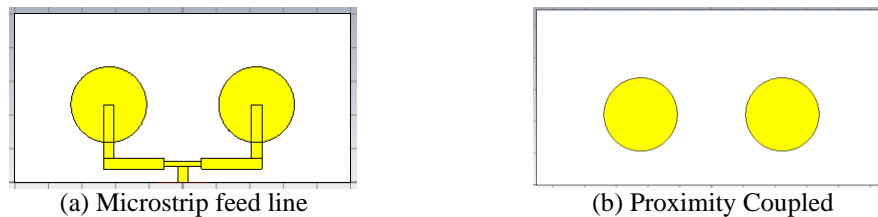
(a) *Microstrip feed line* (b) *Proximity Coupled*
Gambar 3.2 Desain Antena *Single Element*

Setelah dilakukan perancangan dan simulasi, diketahui bahwa baik antenna *single element* dengan *microstrip feed line* maupun dengan *proximity coupled*, keduanya belum memenuhi parameter yang diinginkan. Oleh karena itu, diperlukan optimasi pada dimensi antenna *single* agar sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

3.4.2. Desain Antena Susunan 2 Elemen

Perancangan desain antenna susunan 2 elemen dilakukan untuk meningkatkan *gain* antenna *single element*. Perancangan antenna susunan 2 elemen dilakukan dengan menggunakan teknik pencatutan *microstrip feed line* dan *proximity coupled*. Dimensi catuan antenna didapatkan dari hasil

perhitungan dengan menggunakan persamaan pada dasar teori. Desain antenna susunan 2 elemen dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Desain Antena Susunan 2 Elemen

Setelah dilakukan perancangan dan simulasi, diketahui bahwa hasil simulasi dari kedua desain antenna belum memenuhi parameter yang diinginkan. Oleh karena itu, diperlukan optimasi pada dimensi catuan dan jari-jari *patch* antenna susunan 2 elemen. optimasi dilakukan sampai spesifikasi parameter antenna terpenuhi. Desain antenna inilah yang akan digunakan untuk digandakan dalam perancangan antenna MIMO 4x2.

3.4.3. Desain Antena MIMO 4x2

Setelah dilakukan perancangan dan simulasi, didapatkan bahwa desain antenna susunan 2 elemen dengan teknik pencatuan *proximity coupled* memiliki hasil yang paling ideal untuk digunakan dalam perancangan antenna MIMO 4x2. Dalam perancangan antenna MIMO 4x2 terdapat hal-hal yang perlu diperhatikan, salah satunya adalah jarak antar antenna agar tidak terlalu berdekatan. Pada penelitian ini, perancangan antenna MIMO 4x2 akan dilakukan dengan skenario susunan seperti pada Gambar 3. dengan jarak antar antenna $\geq \lambda/2$.

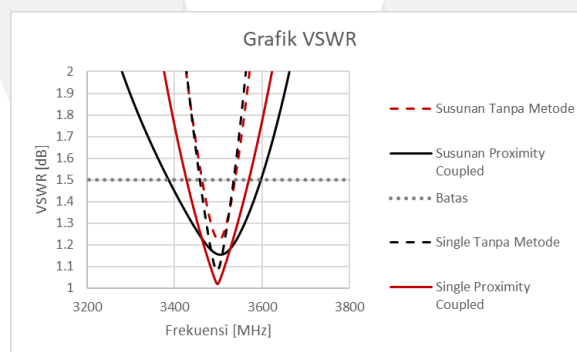


Gambar 3.4 Desain Antena MIMO 4x2 Susunan 2 Elemen

4. Analisis

4.1. Analisis Perbandingan Hasil Simulasi Antena *Single Element* dengan Antena Susunan 2 Elemen

Setelah melakukan perancangan dan simulasi serta optimasi pada masing-masing antenna. Didapatkan perbandingan VSWR dan *bandwidth* yang dihasilkan dari masing-masing antenna seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik VSWR Antena Single Element dan Antena Susunan 2 Elemen

Berdasarkan Gambar 4.1 diketahui bahwa antenna *single element* tanpa *proximity coupled* menghasilkan *bandwidth* sebesar 76,7 MHz dengan nilai VSWR 1,086. Sedangkan untuk antenna *single element* dengan *proximity coupled* menghasilkan *bandwidth* sebesar 141,6 MHz dengan nilai VSWR 1,021. Selain itu, antenna susunan 2 elemen tanpa *proximity coupled* memiliki *bandwidth* sebesar 74 MHz dengan nilai VSWR 1,22. Sedangkan untuk antenna susunan 2 elemen dengan *proximity coupled* memiliki *bandwidth* sebesar 208,9 MHz dengan nilai VSWR 1,15. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan teknik pencatuan *proximity coupled* dapat memperlebar

bandwidth secara signifikan. Untuk data terkait perbandingan antenna *single element* dengan antenna susunan 2 elemen dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan *Bandwidth* dan *Gain*

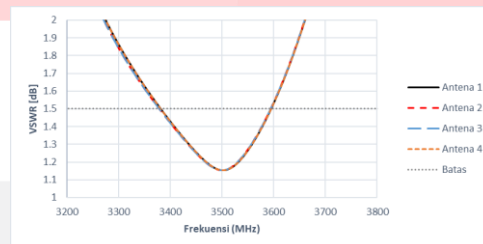
Parameter	Single Element		Susunan 2 Elemen	
	Tanpa <i>Proximity Coupled</i>	Dengan <i>Proximity Coupled</i>	Tanpa <i>Proximity Coupled</i>	Dengan <i>Proximity Coupled</i>
<i>Bandwidth</i>	76,7 MHz	141,6 MHz	74 MHz	208,9 MHz
<i>Gain</i>	2,775 dB	4,183 dB	5,680 dB	6,708 dB

Pada Tabel 4.1 diketahui bahwa penggunaan teknik pencatutan *proximity coupled* dapat meningkatkan *bandwidth* antenna. Pada antenna *single element* dengan *proximity coupled*, *bandwidth* yang didapatkan sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan, namun *gain* yang dimiliki belum memenuhi spesifikasi. Sedangkan pada antenna susunan 2 elemen dengan teknik pencatutan *proximity couple* baik *bandwidth* maupun *gain* yang dihasilkan, keduanya sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Oleh karena itu, antenna susunan 2 elemen dengan teknik pencatutan *proximity coupled* dipilih untuk selanjutnya digunakan untuk dirancang sebagai antenna MIMO 4x2.

4.3 Analisis Hasil Simulasi Antena MIMO 4x2 Susunan 2 Elemen

4.3.1. VSWR dan *Bandwidth*

VSWR dan *bandwidth* anten MIMO 4x2 tampak pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 VSWR Antena MIMO

Berdasarkan Gambar 4.2 *bandwidth* maksimal yang dihasilkan oleh antenna MIMO 4x2 terdapat pada antenna kedua dengan lebar *bandwidth* 214,3 MHz. Sedangkan untuk *bandwidth* minimal yang dihasilkan terdapat pada antenna keempat dengan lebar *bandwidth* 211,4. Hal ini menunjukkan bahwa *bandwidth* yang dihasilkan antenna MIMO 4x2 sudah memenuhi spesifikasi antenna yang diinginkan yaitu ≥ 100 MHz dengan nilai $VSWR \leq 1,5$.

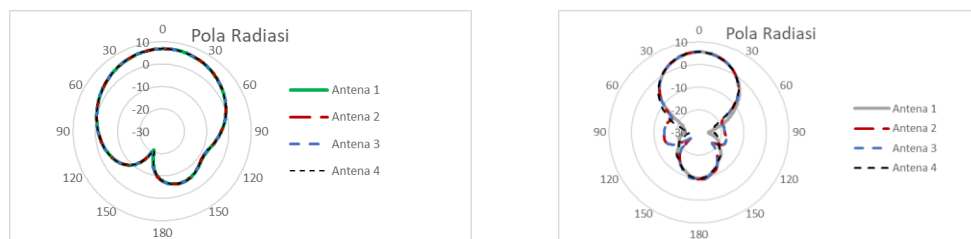
4.3.2. *Gain* dan Pola Radiasi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *gain* yang dihasilkan antenna MIMO sudah mencukupi spesifikasi antenna dengan nilai *gain* sebesar 6,874 dB dan 6,906 dB seperti pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2

Antena	Pertama	Kedua	Ketiga	Keempat
<i>Gain</i>	6,874 dB	6,906 dB	6,906 dB	6,874 dB

Pola radiasi secara elevasi dan azimuth pada antenna MIMO 4x2 susunan 2 elemen dengan teknik pencatutan *proximity coupled* seperti pada Gambar 4.3.



(a) Pola Radiasi Elevasi

(b) Pola Radiasi Azimuth

Gambar 4.3 Pola Radiasi Antena MIMO

Dapat dilihat bahwa pola radiasi masing-masing antenna pada MIMO 4x2 tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Pola radiasi yang dihasilkan, baik secara azimuth maupun elevasi, keduanya memiliki pancaran maksimum yang menuju ke satu arah. Sehingga dapat diketahui bahwa pola radiasi yang dihasilkan antenna MIMO 4x2 dengan teknik pencatuan *proximity coupled* adalah unidireksional sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

4.3.3. Mutual Coupling

Tabel 4.3

S Parameters	Mutual Coupling	S Parameters	Mutual Coupling
S ₂₁	-41,378 dB	S ₁₃	-54,450 dB
S ₃₁	-55,523 dB	S ₂₃	-41,140 dB
S ₄₁	-62,243 dB	S ₄₃	-41,176 dB
S ₁₂	-41,167 dB	S ₁₄	-62,246 dB
S ₃₂	-41,126 dB	S ₂₄	-55,498 dB
S ₄₂	-54,451 dB	S ₃₄	-41,383 dB

Berdasarkan data pada Tabel 4.3, nilai *mutual coupling* pada antenna MIMO 4x2 susunan 2 elemen dengan teknik pencatuan *proximity coupled* memiliki nilai dibawah -20 dB. Nilai maksimal *mutual coupling* terdapat pada antenna 3 terhadap antenna 2 dengan nilai -41,126 dB. Sedangkan untuk nilai minimal *mutual coupling* terdapat pada antenna 4 terhadap antenna 1 dengan nilai -62,246 dB. Dengan demikian dapat diketahui bahwa semakin jauh jarak antar antenna, maka *mutual coupling* yang terjadi akan semakin minimal. Berdasarkan nilai yang didapat, dapat disimpulkan bahwa masing-masing antenna memiliki nilai *mutual coupling* yang sangat baik.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari proses perancangan dan hasil simulasi pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Antena MIMO 4x2 susunan 2 elemen *patch* sirkular yang dirancang sudah sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.
2. Penggunaan teknik antenna susunan dan *proximity coupled* terbukti dapat meningkatkan *gain* dan memperlebar *bandwidth* secara signifikan.
3. Pola radiasi dan *gain* pada antenna MIMO yang dirancang menghasilkan pola radiasi unidireksional dengan *gain* 6,874 dB dan 6,906 dB.
4. *Bandwidth* pada antenna MIMO yang dirancang menghasilkan lebar *bandwidth* paling sempit 211,4 MHz pada antenna keempat.
5. Nilai *mutual coupling* yang dihasilkan sudah sesuai dengan yang diharapkan, dengan nilai terbesar -41,126 dB.

Referensi:

- [1] Global mobile Suppliers Association, "The Road to 5G: Drivers, Applications, Requirements and Technical Development," in A GSA Executive Report from Ericsson, Huawei and Qualcomm, Nov. 2015.
- [2] Hamzah U. Mustakim, "Tantangan Implementasi 5G di Indonesia," in INTEGER: Journal of Information Technology, vol. 4, no. 2, September, 2019.
- [3] Yusnita Rahayu, "High Gain 5G MIMO Antenna for Mobile Base Station," in International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 9, no. 1, February, 2019.
- [4] ITU-R, "Report ITU-R M.2410-0 - Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)," ITU-R, Geneva, 2017.
- [5] C. A. Balanis, Antena Theory Analysis and Design 3rd Edition, Wiley: New Jersey, 1997.
- [6] Rico Bernardo, "Perancangan Antena Mikrostrip Segiempat *Peripheral Slit* untuk Apikasi 2,4 GHz dengan Metode Pencatuan *Proximity Coupled*," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 5, no. 12, pp. 1039-1043, December 2014.