

PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIKROSTRIP MULTIELEMEN PADA FREKUENSI 28 GHz UNTUK APLIKASI 5G

Design and Realization of Multielement Microstrip Antenna at 28 GHz Frequency for 5G Application

Septian Japar¹, Dwi Andi Nurmantris², Yuyu Wahyu³

^{1,2} Universitas Telkom, Bandung

³PPET-LIPI (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia)

sejapar@student.telkomuniversity.ac.id¹, dwiandi@tass.telkomuniversity.ac.id², yuyu@ppte.lipi.go.id³

Abstrak

Perkembangan teknologi saat ini sangat pesat terutama di bidang telekomunikasi. Saat ini kita sudah berada di generasi ke 4 atau disebut 4G, namun seiring meningkatnya kebutuhan akan kecepatan transfer data maka saat ini sedang dipersiapkan teknologi generasi ke 5 atau 5G yang memiliki transfer data rate yang tinggi dengan *bandwidth* yang lebar. Untuk mendukung teknologi 5G ini maka perlu ditingkatkan segala sesuatu yang memegang peranan penting pada teknologi ini salah satunya yaitu antenna.

Pada proyek akhir ini telah dirancang dan direalisasikan antenna mikrostrip multielemen MIMO yang dapat bekerja di spektrum 28 GHz. Antenna yang akan dibuat pada proyek akhir kali ini adalah antenna mikrostrip multielemen dengan *patch rectangular* yang menggunakan teknik MIMO 2 elemen, setiap elemennya memiliki lima *patch rectangular* dengan dimensi yang sama. Kemudian menggunakan teknik SIW yang memiliki *via hole* berderetan pada bagian *patch*, substrat dan *groundplane* yang dapat menunjang performa antenna supaya lebih baik. Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia (Kemkominfo RI) telah menetapkan rentang frekuensi 26.5 GHz – 29.5 GHz yang dapat digunakan pada spektrum tersebut. Bahan yang digunakan sebagai substrat yaitu FR-4 Epoxy kemudian untuk *patch* dan *groundplane* bahan yang digunakan yaitu tembaga.

Hasil dari proyek akhir ini setelah dipabrikasi dan dilakukan pengukuran didapatkan nilai *return loss* elemen satu sebesar -12.706 dB, dan elemen dua sebesar -11.24 dB, VSWR elemen satu sebesar 1.603, dan elemen dua sebesar 1.755, dan *bandwidth* yang didapatkan sebesar 5 GHz pada rentang 25 GHz – 30 GHz.

Kata kunci : Antena Mikrostrip , MIMO , SIW , Multielemen , 5G

Abstract

The current technological development is very rapid, especially in the telecommunications sector. In this moment we are already in the 4th generation or called 4G, but as time passed the need for data transfer speed is currently being prepared technology 5 generation or 5G which has a high data transfer rate with a wide bandwidth. To support this 5G technology, everything that holds it needs to be improved. One of the important roles in this technology is the antenna.

In this final project a microstrip multielement MIMO antenna has been design and realized that can work in the 28 GHz spectrum. The antenna that will be made in this final project is a multielement microstrip antenna with rectangular patch using two element MIMO technique, each element has five rectangular patches with the same dimensions. Then using the SIW technique which has via lined holes on the patch, substrate and groundplane which can support the antenna performance for better. The Ministry of Communication and Information of the Republic of Indonesia (Kemkominfo RI) has determined the frequency range of 26.5 GHz - 29.5 GHz which can be used on that spectrum. The material used as a substrate is FR-4 Epoxy then for patch and groundplane the material used is copper.

The result of this final project after being fabricated and measured, the return loss on element one value is -12.706 dB, and on element two value is -11.24 dB, VSWR on element one value is 1.603, and for element two value is 1.755, and the bandwidth of the both element obtained is 5 GHz in the range of 25 GHz – 30 GHz.

Keyword : Antenna Microstrip, MIMO, SIW, Multielement, 5G.

1. PENDAHULUAN

Pada saat ini tengah disiapkan teknologi 5G yang akan menggantikan teknologi sebelumnya yaitu 4G. Teknologi 5G ini memiliki kecepatan akses data yang sangat cepat dengan kecepatan minimal 1 Gbps [1]. Untuk mendukung hal tersebut maka harus didukung dari berbagai aspek seperti perangkat dan spektrum frekuensi yang akan digunakan pada teknologi 5G. Penggunaan spektrum *millimeter wave* atau spektrum frekuensi diatas 24 GHz adalah spektrum yang paling tepat untuk teknologi 5G, karena spektrum frekuensi yang tinggi dengan *bandwidth* yang lebar dapat menyediakan kapasitas untuk mendukung keterhubungan perangkat dalam jumlah yang besar dengan kecepatan yang tinggi [1]. Salah satu spektrum *millimeter wave* yang dapat digunakan untuk teknologi 5G yaitu pada pita 28 GHz. Pita 28 GHz ditetapkan menggunakan frekuensi antara 26,5 GHz dan 29,5 GHz.

Teknik MIMO merupakan teknik yang menggunakan multi antena baik pada *transmitter* maupun *receiver*. MIMO adalah salah satu teknik yang dapat meningkatkan performansi jaringan 5G. Antena MIMO dibuat lebih dari satu antena pemancar dan lebih dari satu antena penerima bertujuan untuk memanfaatkan propagasi multipath. Pada proyek akhir ini juga menggunakan teknik SIW (*Substrate Integrated Waveguide*) yang berguna untuk menghantarkan sinyal frekuensi tinggi dengan kerugian yang kecil, tetapi memiliki kemampuan mengintegrasikan banyak komponen dengan cara membuat via hole dibagian patch, subatrat dan groundplane. [2]

Beberapa penelitian sebelumnya juga telah dilakukan tentang antena mikrostrip multielemen dengan teknik SIW diantaranya adalah Krishna Reddy, Soumava Mukherjee dan Animesh Biswas melakukan perancangan antena mikrostrip dual frekuensi dengan teknik SIW yang diaplikasikan untuk *x-band* [3]. Kemudian pada penelitian [4] dilakukan Dipti Singh dan R.S. Meena tentang perancangan antena mikrostrip multielemen dengan teknik SIW yang diaplikasikan untuk WiFi/WLAN. Pada [5] dilakukan perancangan antena mikrostrip *rectangular slot* dengan teknik SIW yang menghasilkan *bandwidth* yang lebar. Pada [6] dilakukan perancangan antena mikrostrip slot *triangular* dengan menggunakan teknik SIW yang bertujuan untuk meningkatkan *bandwidth*. Pada [7] dilakukan penelitian oleh Nuansa Dipa Bismoko dengan judul perancangan bandpass filter berbasis *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) dengan metode *Defected Ground Structure* (DGS) untuk diaplikasikan pada *Ground Penetrating Radar* (GPR).

Oleh karena itu, pada proyek akhir ini akan dilakukan perancangan antena mikrostrip multielemen dengan menggunakan teknik SIW yang dapat bekerja pada frekuensi 28 GHz dengan konsep

dasar antena mikrostrip *patch rectangular* sebagai referensi untuk perbandingan. Kemudian antena ini akan diperuntukkan pada handphone untuk teknologi 5G.

2. LANDASAN TEORI

2.1 5G (*Fifth Generation*)

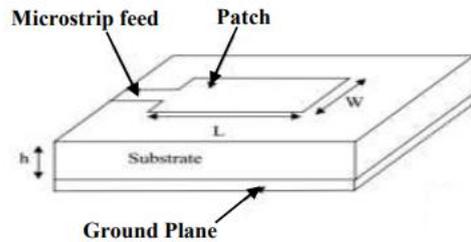
5G atau *fifth generation* adalah teknologi perkembangan dari sebelumnya yaitu 4G (LTE). Layanan 5G yang mensyaratkan kecepatan, cakupan, dan kehandalan menuntut solusi jaringan yang berbeda baik dalam bentuk evolusi jaringan yang ada maupun potensi jaringan baru, model penyebaran yang baru termasuk *small cell*, infrastruktur jaringan yang sesuai yang dapat meliputi konektivitas serat optik dan nirkabel, serta akses ke spektrum frekuensi yang berbeda [1]. Kecepatan akses data yang tinggi pada teknologi 5G dibutuhkan salah satu nya *bandwidth* yang lebar, untuk mencapai itu maka dapat digunakan spektrum frekuensi tinggi pada 5G. Karena spektrum frekuensi yang lebih tinggi dengan *bandwidth* besar dapat menyediakan kapasitas untuk mendukung keterhubungan perangkat dalam jumlah yang besar dengan kecepatan yang tinggi, dan spektrum frekuensi sangat tinggi dengan *bandwidth* yang sangat besar menyediakan kapasitas sangat tinggi dengan latensi yang sangat rendah [1]. ITU-R (*Radio Communication of ITU*) telah mengusulkan spesifikasi minimal yang harus di capai dalam menerapkan teknologi 5G di masa depan [8].

2.2 Antena Array

Antena mikrostrip *array* adalah pengembangan dari antena mikrostrip yang merupakan gabungan dari beberapa elemen peradiasi yang membentuk suatu jaringan. Antena *array* merupakan susunan dari beberapa antena yang identik [9]. Dalam mikrostrip yang di susun secara *array* adalah bagian *patch*. Ada beberapa konfigurasi antena *array* diantaranya linier, planar dan sirkular. Masing-masing konfigurasi memiliki keuntungan. Antena *array* planar adalah *array* dengan susunan elemen *array* membentuk area berbentuk kotak [10].

2.3 Antena Patch Rectangular

Antena *patch rectangular* adalah salah satu antena dimana mudah dalam proses pabriaksi dan banyak digunakan dalam perancangan antena [11]. Karena ketebalan *substrate* lebih tipis daripada panjang gelombang, maka *rectangular patch* dianggap sebagai bidang *planar* dua dimensi untuk lebih memudahkan dalam analisa [12].



Gambar 1 Struktur Antena Mikrostrip [11]

Untuk mendapat ukuran lebar *patch rectangular*, dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.1)$$

Keterangan :

W = Lebar *patch* (mm)
 c = Kecepatan cahaya (m/s)
 f = Frekuensi kerja (GHz)
 ϵ_r = Permittivitas relatif

Sedangkan untuk mencari L (panjang *patch*) dapat menggunakan persamaan berikut :

$$L = L_{\text{eff}} - 2 \Delta L \quad (2.2)$$

Keterangan :

L = Panjang *patch* (mm)
 L_{eff} = Panjang efektif (mm)
 ΔL = Pertambahan dari panjang *patch* (mm)

Kemudian untuk dimensi *substrate* dan *groundplane* nya dapat menggunakan persamaan berikut :

$$L_g = 6 \times h + L \quad (2.3)$$

Keterangan :

L_g = Panjang *groundplane* (mm)
 h = Tebal dielektrik (mm)
 L = Panjang *patch* (mm)

$$W_g = 6 \times h \times W \quad (2.4)$$

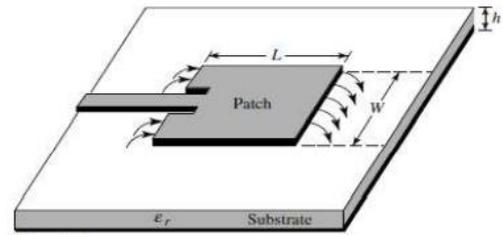
Keterangan :

W_g = Lebar *groundplane* (mm)
 h = Tebal dielektrik (mm)
 W = Lebar *patch* (mm)

2.4 Teknik Pencatutan Mikrostrip Line

Pada proyek akhir ini akan digunakan teknik pencatutan mikrostrip *line*. Pada teknik ini, saluran transmisi akan dihubungkan langsung dengan *patch* [13]. Penggunaan teknik pencatutan ini dipilih karena proses pabrikasi yang mudah karena saluran transmisi dan *patch* terletak pada substrat yang sama

dan juga proses penyepadanan impedansi yang mudah dibanding teknik pencatutan lain.



Gambar 2 Pencatutan Mikrostrip Line Feed [11]

Untuk menentukan lebar *feedline* (W_f), dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$W_f = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.5)$$

Keterangan :

W_f = Lebar *feedline* (mm)
 ϵ_r = Permittivitas relatif

Selanjutnya untuk mengetahui panjang *feedline* (L_f) digunakan teknik *matching impedance*

transformator $\frac{\lambda}{4}$, dengan persamaan berikut :

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

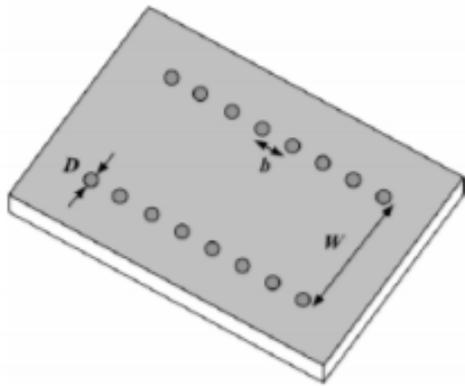
2.5 Teknik Substrate Integrated Waveguide (SIW)

SIW memiliki karakteristik yang hampir sama dengan *waveguide rectangular*, untuk membentuk karakter dinding metal pada mikrostrip maka dibentuk sebuah *cavity resonator* menggunakan deretan *via hole* dari metal secara periodik [2]. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Untuk dapat mengurangi rugi-rugi kebocoran maka parameter diameter *via* (d) dan jarak antar *via* (s) dibuat menurut aturan yang ada menggunakan persamaan berikut :

$$\lambda_g/5 < d < \quad (2.7)$$

$$s \leq 2d \quad (2.8)$$



Gambar 3 Teknik SIW (*Substrate Integrated Waveguide*)

2.6 MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

Multiple Input Multiple Output (MIMO) adalah suatu sistem yang terdiri dari lebih dari satu terminal atau antena pada sisi pengirim dan penerima. Dengan penggunaan antena lebih dari satu antena, MIMO mendukung spesifikasi media transmisi yang membutuhkan kapasitas besar pada sistem komunikasinya. Sistem ini menggunakan sejumlah M antena pemancar dan sejumlah N antena penerima, sehingga sering ditulis dengan sistem penulisan MIMO $M \times N$. [13] Pemodelan sinyal MIMO dipedakan menjadi dua yaitu model Spatial Multiplexing dan model Diversity. [14]

- *Spatial Multiplexing*
Teknik ini merupakan teknik pertama yang digunakan pada MIMO. Pada sisi pengirim sinyal akan ditransmisikan melalui beberapa lintasan *multipath* yang kemudian akan di terima di sisi penerima. Dengan teknik ini memungkinkan mencapai kapasitas kanal yang besar. [14]
- *Diversity*
Pada model *diversity* data yang dipancarkan pada setiap antena pemancar adalah sama. Kemudian dapat digunakan metode *transmitter selection diversity* untuk memilih satu pemancar saja dengan kualitas terbaik. Sedangkan pada penerima digunakan metode *combining* (EGC/MRC) untuk mendapatkan diversitas murni. Model *diversity* digunakan untuk mengurangi galat akibat *fading* dan *noise* dengan diversitas antena pada pemancar dan penerima. [14]

Antena MIMO juga memiliki karakteristik. Adapun karakteristik antena MIMO adalah sebagai berikut :

- *Mutual Coupling* dan Isolasi

Mutual coupling adalah efek yang menyebabkan terjadinya penurunan kualitas parameter antena. *Mutual coupling* dapat diukur dengan melihat besaran isolasi, Isolasi di definisikan sebagai besar daya transmisi antara dua input *port* pada antena *multiport* yang diuji. Dalam sistem MIMO, pengaruh efek *mutual coupling* diusahakan seminimal mungkin karena mempengaruhi performa setiap antena. [15]

- Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi yaitu koefisien yang menyatakan tingkat kesamaan antara sinyal yang diterima oleh masing-masing antena. Koefisien korelasi bernilai dari 0 hingga 1. idealnya, sistem *diversity* membutuhkan koefisien korelasi mendekati nol artinya sinyal yang diterima oleh masing-masing antena adalah tidak sama. Koefisien korelasi harus sekecil mungkin. [15]

3. PERANCANGAN ANTENA

3.1 Spesifikasi Antena

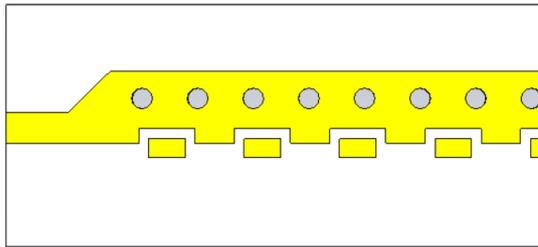
Langkah awal dalam merancang antenna adalah dengan menentukan spesifikasi antena sebagai acuan. Adapun spesifikasi antena tersebut, yaitu :

- | | |
|---------------------------|------------------|
| a. VSWR | : ≤ 2 |
| b. <i>Return Loss</i> | : ≤ -10 dB |
| c. <i>Bandwidth</i> | : ≥ 500 MHz |
| d. <i>Mutual Coupling</i> | : ≤ -20 dB |
| e. Frekuensi Kerja | : 28 GHz |

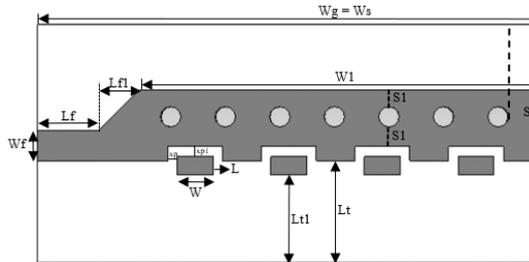
3.2 Perancangan Antena

3.2.1 Perancangan Antena Mikrostrip Multielemen

Dalam merancang antena mikrostrip ada berbagai macam bentuk *patch* yang dapat digunakan. Pada Gambar 4 dapat dilihat antena yang dirancang pada proyek akhir kali ini memiliki bentuk *patch rectangular* yang disusun secara berderetan dengan dimensi yang sama. Pada antena ini menggunakan teknik SIW (*Substrate Integrated Waveguide*), teknik ini merupakan teknik membuat *via hole* pada bagian *patch*, substrat dan *groundplane* yang berfungsi untuk mengarahkan pancaran antena dan juga dapat meningkatkan *bandwidth*.

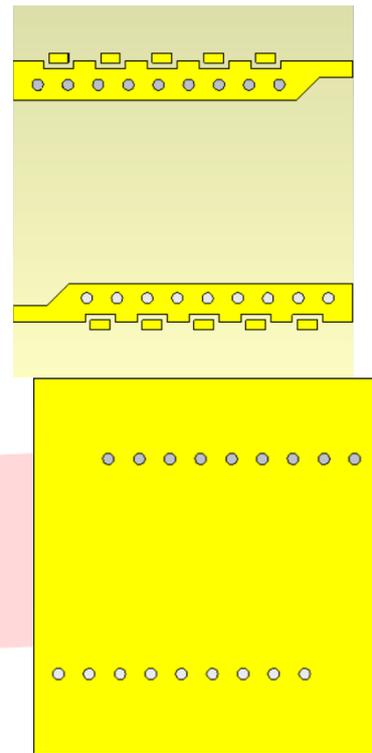


Gambar 4 Desain Awal Antena Mikrostrip Multielemen



Gambar 5 Dimensi Antena

$L_f = 5.5$ mm, $W_f = 2.75$ mm, L_g & $L_s = 14$ mm, W_g & $W_s = 36$ mm, $L = 1.6838$ mm, $W = 3.26$, $L_{f1} = 3.5$ mm, $W_1 = 38$ mm, $x_{p1} = 1.2$ mm, $x_{p1} = 1.25$ mm, $d = 1.2$ mm, $S = 2$ mm, $S_1 = 1$ mm, $L_t = 6$ mm, $L_{t1} = 5.7$ mm.



(a)
(b)

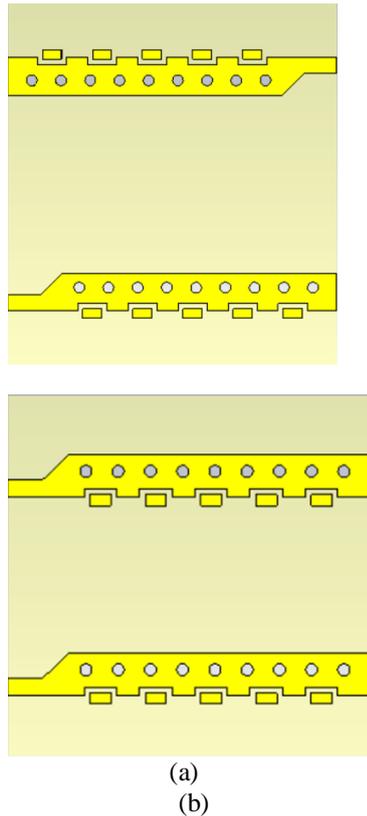
Gambar 6 Bentuk Simulasi Antena MIMO (a) Tampak Depan (b) Tampak Belakang

3.2.2 Perancangan Antena Mikrostrip Multielemen MIMO Dua Elemen

Setelah perancangan antena satu elemen sudah sesuai dengan parameter yang diinginkan, maka akan dilakukan perancangan antena MIMO dua elemen.

3.3 Penempatan Port

Terdapat dua konfigurasi peletakan *port* pada setiap elemen antena MIMO, dimana akan dicari peletakan seperti apa yang memberikan nilai *mutual coupling* paling kecil. Kedua konfigurasi *port* terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Konfigurasi Port (a) Satu (b) Dua

Nilai *mutual coupling* pada masing-masing konfigurasi port diperlihatkan pada Tabel 1 :

Tabel 1 Konfigurasi Port (a) Satu (b) Dua

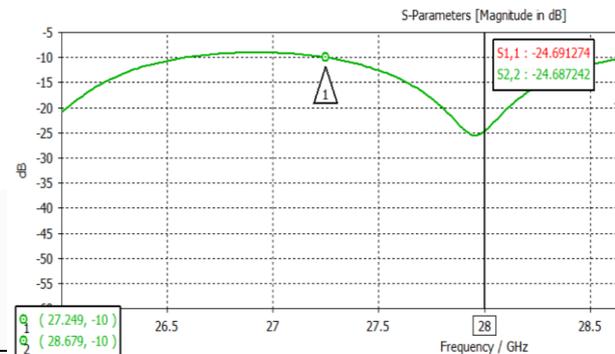
S Parameter	Konfigurasi Satu (dB)		Konfigurasi Dua (dB)		Bandwidth	
	Antena 1	Antena 2	Antena 1	Antena 2	Simulasi	Pengukuran
S11	-24.691274	-24.687242	-26.986194	-12.706	1430 MHz	5000 MHz
S21	-31.099892	-28.482965	-27.66955	-11.24	1430 MHz	5000 MHz
S12	-31.11895	-28.482965	-27.66955	-11.24	1430 MHz	5000 MHz
S22	-24.687242	-24.687242	-27.66955	-11.24	1430 MHz	5000 MHz

Semakin dekat jarak antar antenna, *mutual coupling* semakin besar. Hal ini dikarenakan pengaruh radiasi dari antenna yang bersebelahan semakin besar. Berdasarkan data dari Tabel 1 maka pada perancangan ini dipilih posisi peletakkan port antenna saling bersudut 180°.

dilakukan dengan menggunakan perangkat *Network Analyzer*. Namun, *Network Analyzer* yang digunakan hanya dapat menampilkan grafik hasil pengukuran maksimal di frekuensi 30 GHz. Prosedur pengukurannya yaitu pertama mengatur frekuensi kerja pada *Network Analyzer* sesuai frekuensi antenna yang akan diukur. Lalu lakukan kalibrasi alat dengan kit kalibrasi. Kemudian menghubungkan antenna ke *port network analyzer*. Berikut adalah hasil pengukuran yang didapatkan.

Return Loss dan Bandwidth

Pada Tabel 2 dapat dilihat kedua antenna memiliki *return loss* ≤ -12.706, hal ini sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan yaitu *return loss* ≤ -10. Adapun nilai *bandwidth* yang diperoleh dari kedua antenna sebesar ≥ 1400 MHz, hal ini sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan yaitu *bandwidth* ≥ 500 MHz.



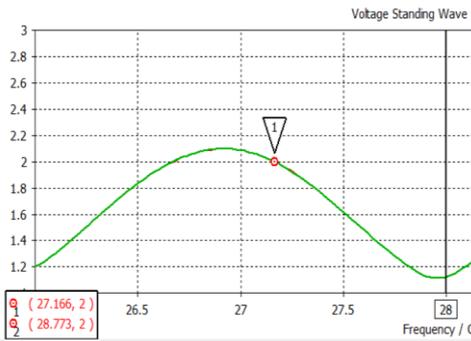
VSWR

Pada Tabel 3 dapat dilihat kedua antenna memiliki VSWR ≤ 1,755. Hal ini sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan yaitu VSWR ≤ 2.

4. HASIL SIMULASI, PENGUKURAN DAN ANALISIS

4.1 Hasil Pengukuran VSWR, Return Loss, Bandwidth dan Impedansi

Proses pengukuran parameter medan dekat vswr, *return loss*, *bandwidth* dan impedansi



Gambar 9 Grafik VSWR pada Antena Mikrostrip Multielemen MIMO

Tabel 3 Perbandingan VSWR Antena antara Simulasi dengan Pengukuran

Antena	VSWR	
	Simulasi	Pengukuran
Antena 1	1.1237483	1.603
Antena 2	1.1238093	1.755

• *Mutual Coupling*

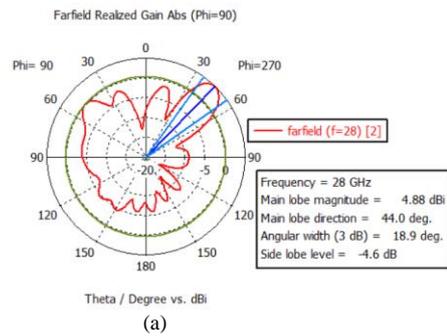
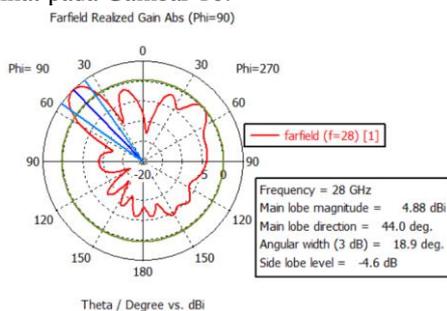
Pada Tabel 4 dapat dilihat hasil simulasi parameter *Mutual Coupling* dengan posisi antar elemen antena saling bersudut 180°. Adapun hasil simulasi *Mutual Coupling* antar antena sebesar ≤ -31 , hasil simulasi ini sudah baik karna sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan yaitu ≤ -20 . Penulis tidak melakukan pengukuran *Mutual Coupling* dengan alat ukur karena keterbatasan alat yang tersedia.

Tabel 4 *Mutual Coupling*

S Parameter	<i>Mutual Coupling</i>
S21	-31.099892 dB
S12	-31.11895 dB

4.3 Analisis Simulasi Pola Radiasi

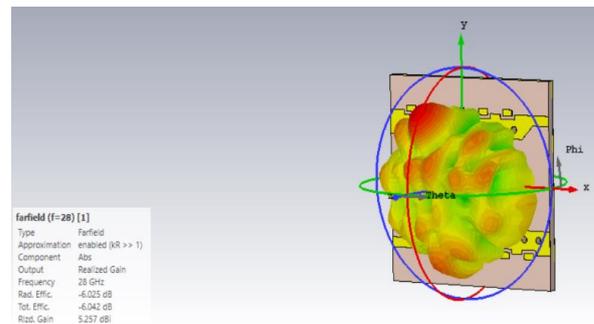
Pola radiasi antena dapat dilihat pada daerah medan jauh antena. Namun karena keterbatasan alat sehingga tidak dilakukan pengukuran medan jauh antena, hanya dilihat pada simulasi *software CST Studio Suite 2019*, untuk hasil simulasi pola radiasi dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 Simulasi Pola Radiasi Antena

4.4 Analisis Simulasi Gain

Nilai *gain* yang diperoleh pada simulasi kedua elemen sebesar 5.257 dBi sehingga dapat disimpulkan bahwa *Gain* antena yang didapat sudah memenuhi spesifikasi. Dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Simulasi Nilai Gain Antena

5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa pada proses perancangan, simulasi dan pengukuran antena mikrostrip multielemen yang telah dilakukan maka di dapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Antena yang dibuat mempunyai jenis mikrostrip dan menggunakan teknik MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).
2. Antena yang dibuat menggunakan teknik SIW (*Substrate Integrated Waveguide*).
3. Antena yang dirancang dapat bekerja pada rentang frekuensi yang sesuai dengan spesifikasi yaitu 28 GHz dengan VSWR yang didapatkan dari hasil pengukuran pada Elemen satu yaitu 1.603 dan pada Elemen dua yaitu 1.755. *Bandwidth* yang dihasilkan juga memenuhi spesifikasi yaitu dari hasil pengukuran kedua Elemen adalah 5 GHz. *Mutual Coupling* kedua antena dari hasil simulasi ≤ -20 dB, *Gain* antena sebesar 5.257 dBi.

4. Mengubah konfigurasi peletakkan port menjadi saling bersudut 180° dapat memperkecil *mutual coupling*. Perubahan jarak antar antenna mempengaruhi *mutual coupling*, semakin jauh jarak antar antenna *mutual coupling* semakin kecil.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pembangunan Proyek Akhir ini, dapat disampaikan beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya yaitu :

1. Gunakan bentuk *patch* atau modifikasi yang lain untuk mendapatkan performansi yang lebih baik.
2. Melakukan penelitian dengan frekuensi kerja yang sama namun menggunakan bahan substrat berbeda.
3. Fabrikasi antenna sebaiknya dilakukan dengan lebih presisi agar didapatkan hasil realisasi antenna yang sesuai. Begitu juga dengan penyolderan *port* antenna, lakukan dengan lebih rapi.
4. Melakukan hingga pengukuran medan jauh antenna.

REFERENSI

- [1] Puslitbang SDPPI, "Studi Lanjutan 5G Indonesia 2018 Outlook dan Use Case Untuk Layanan 5G Indonesia," pp. 1-71, 2018.
- [2] A. Saputra, N. Ismail and A. Munir, "Perancangan Antena Mikrostrip Berbasis Substrate Integrated Waveguide (SIW) untuk Aplikasi WLAN," *Seminar Nasional Microwave, Antena dan Propagasi (SMAP)*, pp. 119-120, 2018.
- [3] K. Reddy, S. Mukherjee and A. Biswas, "Design of HMSIW Fed Dual Frequency Microstrip Patch Antenna for X-band Applications," *International Journal of IEEE*, pp. 203-204, 2016.
- [4] D. Singh and R. Meena, "A Novel Microstrip Patch Antenna Using SIW Technique for WLAN/Wi-Fi Applications in C-Band," *International Journal of IEEE*, pp. 1-4, 2015.
- [5] S. Yun, D.-Y. Kim and S. Nam, "Bandwidth and Efficiency Enhancement of Cavity-Backed Slot Antenna Using a Substrate Removal," *International Journal of IEEE*, vol. 11, pp. 1458-1461, 2012.
- [6] D. W. Astuti, M. Asvial, F. Y. Zulkifli and E. T. Rahardjo, "Bandwidth Enhancement on Half-Mode Substrate Integrated Waveguide Antenna Using Cavity-Backed Triangular Slot," *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-9, 2020.
- [7] N. D. Bismoko, "Perancangan Banpass Filter Berbasis Substrate Integrated Waveguide (SIW) dengan Metode Defected Ground Structure (DGS) Untuk Aplikasi Ground Penetrating Radar (GPR)," Fakultas Teknologi Industri, Surabaya, 2016.
- [8] R. S. G. ITU, Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s), Geneva: ITU, 2017.
- [9] F. Y. Zulkifli, E. T. Rahardjo, M. Asvial and D. Hartanto, "Pengembangan Antena Mikrostrip Susun Dua Elemen dengan Penerapan Defected Ground Structure Berbentuk Trapesium," *MAKARA*, vol. 12, no. 2, pp. 80-85, November 2008.
- [10] A. A. Nidardika, K. Sujatmoko and Y. Wahyu, "Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip Array Rectangular Untuk Radar Pada Frekuensi L-Band," Universitas Telkom, Bandung, 2019.
- [11] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, Canada: John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2016.
- [12] M. R. Sumpena, H. Madiawati and Elisma, "Desain Antena Susun Mikrostrip Rectangular Patch 4x2 Untuk Aplikasi 5G," *Prosiding The 11th Industrial Research Workshop and National*, pp. 591-595, Agustus 2020.
- [13] A. Rizky, Koesmarjianto and Waluyo, "Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip 4x4 Patch Circular Pada Frekuensi 2.4 GHz Untuk Aplikasi WLAN 802.11n," *JARTEL*, pp. 23-27, 2018.
- [14] E. Roza and M. Mujirudin, "Sistem Mimo dan Aplikasi Penggunaannya," *Rekayasa Teknologi*, vol. 6, no. 2, pp. 14-17, 2013.
- [15] A. Sianipar, "Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip MIMO Bowtie 4x4 dengan Corner Reflektor 90° pada Frekuensi 1,8 GHz untuk Aplikasi LTE Melalui Teknik Pencatutan Mikrostrip Line," <https://elibrary.unikom.ac.id/>, Bandung, 2018.

