

## Desain dan Evaluasi Kinerja Antena Mikrostrip Array 2x1 dengan Frekuensi 25 GHz untuk Sistem Komunikasi 5G

Qinthara Al Ghifari<sup>1</sup>, Muhammad Taufik<sup>2</sup>, Mutiara Windasari Sitopu<sup>3</sup>,  
Nur Adilah<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Politeknik Negeri Medan

Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155, Medan, Indonesia

20155 email:

e-mail: [qintharaalghifari@students.polmed.ac.id](mailto:qintharaalghifari@students.polmed.ac.id)

[muhammadtaufik@students.polmed.ac.id](mailto:muhammadtaufik@students.polmed.ac.id)

**Abstrak-** Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi kinerja antena mikrostrip array 2x1 pada frekuensi 25 GHz untuk mendukung sistem komunikasi 5G. Dengan menggunakan substrat FR-4 yang memiliki sifat dielektrik stabil namun tantangan rugi-rugi dielektrik, antena dirancang untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja transmisi. Analisis dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2024, yang mengevaluasi parameter seperti Return Loss, Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), gain, pola radiasi, dan efisiensi radiasi. Hasil simulasi menunjukkan nilai return loss sebesar -10,933 dB dan VSWR sebesar 1,79, yang mengindikasikan kecocokan impedansi yang memadai. Selain itu, pola radiasi yang terarah dengan gain maksimum 3,867 dBi mengonfirmasi kesesuaian antena untuk aplikasi frekuensi tinggi. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi antena yang efisien untuk aplikasi 5G, khususnya pada pita frekuensi milimeter wave.

**Kata Kunci:** Antena Mikrostrip, Array 2x1, 25 GHz, Return Loss, VSWR, 5G.

**Abstract—** This study aims to design and evaluate the performance of a 2x1 microstrip array antenna at a frequency of 25 GHz to support 5G communication systems. By using FR-4 substrates that have stable dielectric properties but challenges of dielectric losses, the antenna is designed to maximize efficiency and transmission performance. The analysis is carried out through simulation using CST Studio Suite 2024 software, which evaluates parameters such as Return Loss, Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), gain, radiation pattern, and radiation efficiency. The simulation results show a return loss value of -10.933 dB and a VSWR of 1.79, indicating adequate impedance matching. In addition, the directional radiation pattern with a maximum gain of 3.867 dBi confirms the suitability of the antenna for high-frequency applications. This study is expected to contribute to the development of efficient antenna technology for 5G applications, especially in the millimeter wave frequency band.

**Keywords:** Microstrip Antenna, 2x1 Array, 25 GHz, Return Loss, VSWR, 5G.

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Teknologi 5G jika dibandingkan dengan jaringan seluler generasi keempat, generasi kelima memberikan peningkatan yang signifikan dalam hal kecepatan, kapasitas, dan latensi. Selain mempercepat pengunduhan dan pengunggahan, kapasitas pemrosesan data 20 Gbps 5G memungkinkan koneksi yang lebih andal dan konsisten untuk berbagai aplikasi yang membutuhkan bandwidth, termasuk game online dan streaming video berkualitas tinggi. Pengguna mungkin mengharapkan kecepatan internet lebih tinggi dengan jaringan 5G, yang 20 kali lebih cepat dibandingkan jaringan 4G (LTE). (Nuriya, 2023)

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel generasi kelima (5G) telah memicu kebutuhan akan perangkat antenna yang memiliki kinerja tinggi dalam hal efisiensi, lebar pita, dan polaritas yang baik. Teknologi 5G beroperasi pada frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan generasi sebelumnya, terutama pada pita frekuensi 25-28 GHz, yang dikenal sebagai bagian dari milimeter wave (mmWave) (Zhang, 2021). Pada frekuensi ini, antenna perlu memiliki desain yang kompak namun tetap mampu memancarkan sinyal dengan efisiensi dan directivity yang optimal. (Khan, 2020)

Antena adalah bagian penting dari sistem komunikasi yang berfungsi sebagai alat untuk mengubah impuls listrik menjadi gelombang elektromagnetik atau sebaliknya. Untuk memastikan transmisi dan penerimaan sinyal yang efektif, antena memainkan peran penting. Antena adalah elemen kunci yang memungkinkan keberhasilan transmisi data jarak jauh dalam aplikasi termasuk sistem satelit, radar, telekomunikasi, dan navigasi.

Seiring berkembangnya teknologi, desain dan performa antenna terus mengalami inovasi untuk memenuhi kebutuhan yang semakin menantang. Salah satu inovasi paling signifikan tersebut adalah munculnya antenna microstrip, sebuah antenna berukuran kecil dan ringan yang cocok untuk diaplikasikan pada perangkat dengan ruang yang terbatas. Antenna microstrip terdiri atas patch logam di atas substrat dielektrik, memberikan keuntungan berupa integrasi yang mudah dengan perangkat elektronik serta efisiensi manufaktur yang tinggi.

Selain itu, pengembangan konfigurasi antenna array memungkinkan peningkatan performa antenna, seperti penguatan sinyal (gain), directivitas, dan efisiensi energi dalam menggabungkan beberapa elemen antenna ke dalam susunan tertentu, antenna array mampu memfokuskan radiasi ke arah yang diinginkan, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan presisi tinggi, seperti radar, komunikasi satelit, dan jaringan 5G

Studi mengenai antenna, termasuk pengembangan desain inovatif dan analisis performa, menjadi sangat penting di era yang serba digital. Kebutuhan akan system komunikasi yang cepat, handal, dan mendukung perangkat modern mendorong penelitian dan pengembangan di bidang antenna untuk memberikan kontribusi signifikan terhadap kemajuan teknologi komunikasi global.

Perancangan, pemodelan, dan analisis antenna mikrostrip larik dua elemen merupakan tujuan dari praktikum ini. Untuk mengevaluasi kinerja antenna yang dirancang, sejumlah parameter antenna akan diperiksa selama prosedur ini, termasuk VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), Return Loss, Gain, dan Pola Radiasi. Selain itu, praktikum ini menjelaskan tentang dasar-dasar pengoperasian antenna mikrostrip dan metode optimasi setup array.

Dalam penelitian ini, dilakukan perancangan dan analisis kerja antenna microstrip array 2x1 yang beroperasi pada frekuensi 25 GHz dengan menggunakan substrat FR-4. Substrat FR-4 dipilih karena sifat dielektriknya yang stabil dan mudah diproduksi. Namun, memiliki tantangan terkait rugi-rugi dielektrik (*dielectric loss*). Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi return loss, VSWR, gain, pola radiasi, dan efisiensi radiasi antenna melalui simulasi yang penulis gunakan yaitu aplikasi CST Studio Suite 2024.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan antenna untuk system komunikasi 5G dengan performa yang kompeten. Hal ini bertujuan agar peserta praktikum dan pembaca dapat memperoleh kemahiran dalam menciptakan sistem komunikasi yang lebih efektif dan efisien sesuai dengan tuntutan teknologi masa kini dengan memahami gagasan mendasar dan analisis kerja antenna mikrostrip array dua elemen.

## II. STUDI PUSTAKA

Penelitian ini mengkaji antenna mikrostrip rectangular patch array dengan fokus pada aplikasi di frekuensi 25 GHz. Studi pustaka dilakukan dengan menganalisis berbagai literatur terbaru dari 5 tahun terakhir untuk memahami konsep dasar, metode desain, dan hasil penelitian sebelumnya yang relevan.

Antena mikrostrip menjadi salah satu teknologi yang banyak digunakan dalam system komunikasi nirkabel modern karena keunggulannya dalam hal ukuran yang padat, ringan, serta fleksibel dalam proses fabrikasi. Pada frekuensi milimeter wave (mmWave), khususnya 25 GHz, antenna mikrostrip memiliki potensi besar untuk mendukung system komunikasi 5G dengan kinerja optimal. Menurut (Zhang, 2021), desain antenna array bertipe 2x1 dapat meningkatkan gain, directivity, serta meminimalisirkan rugi-rugi akibat interferensi antar elemen antenna.

### Desain Antena Mikrostrip Rectangular Patch

Berukuran kompak, antena patch persegi panjang mikrostrip cocok untuk aplikasi pita frekuensi tinggi. Chen dkk. (2019) menemukan bahwa antena patch persegi panjang adalah pilihan paling populer untuk aplikasi komunikasi 5G karena gain yang tinggi dan efisiensi yang unggul. Studi ini juga menunjukkan betapa pentingnya pengoptimalan dimensi patch untuk mencapai kinerja puncak pada pita mmWave.

### Penggunaan Substrat Dielektrik FR4 untuk Frekuensi Tinggi

Karena keterjangkauan dan ketersediaannya yang luas, substrat dielektrik FR4 masih menjadi pilihan umum untuk desain antena mikrostrip. Gupta dkk. (2020) mengklaim bahwa substrat FR4 memiliki lebih banyak kerugian dielektrik dibandingkan substrat khusus mmWave. Studi ini menunjukkan bahwa FR4 dapat dioptimalkan dengan topologi array untuk meningkatkan penguatan antena meskipun kerugian dielektrik tetap ada.

Pencocokan Impedansi Feedline, Penelitian oleh Park et al. (2023) menyelidiki pentingnya pencocokan impedansi dalam konstruksi jalur antena mikrostrip. Transfer daya terbaik melintasi antena patch dicapai dengan menggunakan feedline dengan impedansi 50 ohm dan 70,71 ohm. Pada frekuensi mmWave, feedline ini juga membantu menurunkan kerugian gearbox.

Implementasi Frekuensi 25 GHz untuk 5G, Untuk teknologi 5G, salah satu pita mmWave yang disarankan adalah 25 GHz. Antena mikrostrip yang dibangun pada pita ini dapat menawarkan bandwidth yang memadai dan kinerja radiasi yang baik untuk komunikasi data berkecepatan tinggi, klaim Zhang et al. (2021). Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa masalah efisiensi radiasi rendah pada pita frekuensi tinggi dapat diselesaikan dengan menggunakan pendekatan array.

Studi lain oleh (Arifin, 2020) dalam *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi* menunjukkan bahwa antenna mikrostrip array dengan konfigurasi 2x1 dapat mencapai gain lebih dari 5 dBi pada frekuensi 25 GHz, yang sesuai untuk keperluan komunikasi 5G. Desain array ini juga menghasilkan pola radiasi yang terarah dengan back lobe yang minimal, menjadikannya efektif untuk sistem transmisi berkecepatan tinggi dan jangkauan yang lebih fokus.

Pola radiasi merupakan representasi distribusi energi yang dipancarkan oleh antena ke ruang bebas dalam berbagai sudut, yang biasanya divisualisasikan dalam bentuk plot kutub. Pola radiasi dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis, di antaranya pola omnidireksional, di mana radiasi merata ke segala arah dalam satu bidang tertentu, dan pola direktif, yang memiliki intensitas radiasi tinggi dengan pancaran yang lebih terfokus ke arah tertentu (Balanis, 2016). Representasi pola radiasi sering divisualisasikan dalam bentuk peta tiga dimensi, yang menggambarkan bagaimana energi antena dipancarkan dalam ruang angkasa (Ahmed & Kim, S. H, 2022). Selain itu, pola radiasi juga mendeskripsikan distribusi daya yang dipancarkan antena sebagai fungsi dari sudut tertentu dalam bidang azimuth maupun elevasi. Pemahaman pola radiasi ini sangat penting dalam desain antena, terutama untuk aplikasi yang membutuhkan fokus energi radiasi ke arah tertentu, seperti pada sistem komunikasi 5G dan teknologi millimeter wave (LI, J, 2020)

- Return Loss

Return loss didefinisikan sebagai proporsi amplitudo gelombang yang ditransmisikan terhadap spektrum gelombang yang dipantulkan. Ketidakesesuaian antara impedansi saluran transmisi dan impedansi masukan beban dapat mengakibatkan return loss. (Persia, 2022)

- VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

VSWR adalah proporsi antara amplitudo gelombang berdiri pada maksimum ( $|V|_{\text{maks}}$ ) dan minimum ( $|V|_{\text{min}}$ ). Tegangan yang ditransmisikan ( $V_0^+$ ) dan tegangan pantulan ( $V_0^-$ ) adalah dua bagian gelombang tegangan pada saluran transmisi. Koefisien refleksi tegangan ( $\Gamma$ ) adalah perbandingan tegangan yang ditransmisikan dan dipantulkan. (Persia, 2022)

- Lebar Pita (Bandwidth)

Lebar pita frekuensi yang digunakan suatu sistem dikenal sebagai bandwidthnya. Ketika kriteria tertentu terpenuhi, sejumlah parameter dapat digunakan untuk menentukan bandwidth antena. (Persia, 2022) (Arifin, 2020)

- CST Microwave Studio

Nugroho et al. (2019) dalam *Jurnal Telekomunikasi dan Komunikasi Digital* menyebutkan bahwa perangkat lunak simulasi seperti CST Microwave Studio sangat membantu dalam mengevaluasi parameter antenna seperti return loss, VSWR, dan gain. Dengan simulasi yang akurat, desain antenna dapat dioptimalkan sebelum melalui proses fabrikasi sehingga mengurangi biaya produksi.

### III. METODE PENELITIAN

#### A. Tahapan Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan jurnal ini merupakan pendekatan eksperimental berbasis simulasi dan pengukuran langsung, meliputi:

1. Studi literatur  
Dilakukan studi literatur untuk memahami teori dasar antenna microstrip, desain antenna array, dan implementasi pada frekuensi mmWave, terutama di pita 25-29GHz, kajian dilakukan berdasarkan jurnal dan artikel terkini dari 5 tahun terakhir
2. Perancangan Antena microstrip  
Antenna di desain untuk frekuensi 25 GHz dengan substrat FR4 ( $\epsilon_r=4.65$ ,  $h=1,6$  mm,  $t=0,035$ mm). Langkah perancangan meliputi:
  - Menghitung dimensi patch (lebar dan Panjang)
  - Menentukan ukuran ground plan
  - Mendesain feedline dengan impedansi 50 ohm dan 70 ohm
  - Mengatur jarak antar elemen array 2x1
3. Simulasi rancangan  
Desain antenna disimulasikan menggunakan aplikasi seperti CST Studio Suite dan HFSS untuk mengevaluasi parameter seperti gain, return loss, VSWR, dan pola radiasi. Dalam penulisan ini, penulis menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2024.

#### B. Perhitungan Dimensi Antena

##### a. Perhitungan Lebar Patch ( $W$ )

Rumus:

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Substitusi nilai ( $f_0 = 25$  GHz,  $c = 3 \times 10^8$  m/s,  $\epsilon_r = 4.65$ ):

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 25 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.65 + 1}} = 4.74 \text{ mm.}$$

**b. Perhitungan Panjang Patch ( $L$ )**

Rumus:

$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L,$$

dengan  $\epsilon_{\text{reff}}$  dan  $\Delta L$  dihitung sebagai:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5},$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)}.$$

Substitusi nilai:

$$\epsilon_{\text{reff}} = 4.051, \quad \Delta L = 0.204 \text{ mm}.$$

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 25 \times 10^9 \sqrt{4.051}} - 2 \times 0.204 = 3.74 \text{ mm}.$$

**c. Dimensi Ground Plane**

Dimensi ground plane dihitung sebagai:

$$W_g = W + 6h, \quad L_g = L + 6h.$$

Substitusi nilai:

$$W_g = 4.74 + 6 \times 1.6 = 14.34 \text{ mm}, \quad L_g = 3.74 + 6 \times 1.6 = 13.34 \text{ mm}.$$

**d. Perhitungan Feedline**

Feedline untuk impedansi 50 ohm ( $W_f50$ ):

$$W_f = \frac{8h}{\exp \left( \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \left( 0.23 + 0.11 \frac{1}{\epsilon_r} \right) \right) - 2}.$$

Substitusi ( $Z_0 = 50 \Omega$ ):

$$W_f50 = 0.64 \text{ mm}.$$

Feedline untuk impedansi 70.71 ohm ( $W_f70$ ):

$$W_f70 = 0.39 \text{ mm}.$$

Panjang feedline ( $L_f$ ):

$$L_f = \frac{\lambda_g}{4},$$

dengan:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}, \quad \lambda_0 = \frac{c}{f_0}.$$

$$\lambda_g = 5.97 \text{ mm}, \quad L_f = 1.49 \text{ mm}.$$

e. Perhitungan Feedline

- Lebar Feedline untuk 50 ohm ( $W_f50$ ):

$$W_f50 = 0.62 \text{ mm.}$$

- Lebar Feedline untuk 70.71 ohm ( $W_f70$ ):

$$W_f70 = 0.38 \text{ mm.}$$

- Panjang Feedline ( $L_f$ ):

$$L_f = \frac{\lambda_g}{4},$$

dengan:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}, \quad \lambda_0 = \frac{c}{f_0}.$$

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{27.5 \times 10^9} = 10.91 \text{ mm,}$$

$$\lambda_g = \frac{10.91}{\sqrt{4.049}} = 5.43 \text{ mm,} \quad L_f = \frac{5.43}{4} = 1.36 \text{ mm.}$$

f. Jarak Antar Patch ( $d$ )

Jarak antar patch dalam array dihitung sebagai:

$$d = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{5.43}{2} = 2.71 \text{ mm.}$$

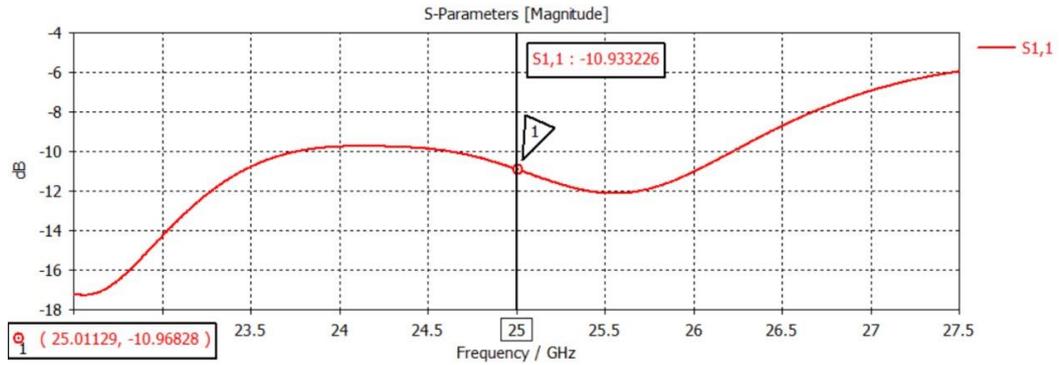
Validasi Hasil:

Simulasi dilakukan untuk memvalidasi parameter berikut:

- Return loss diharapkan <-10dB
- VSWR: nilai ideal mendekati 1
- Gain: gain antenna array dievaluasi untuk menghasilkan >5dB

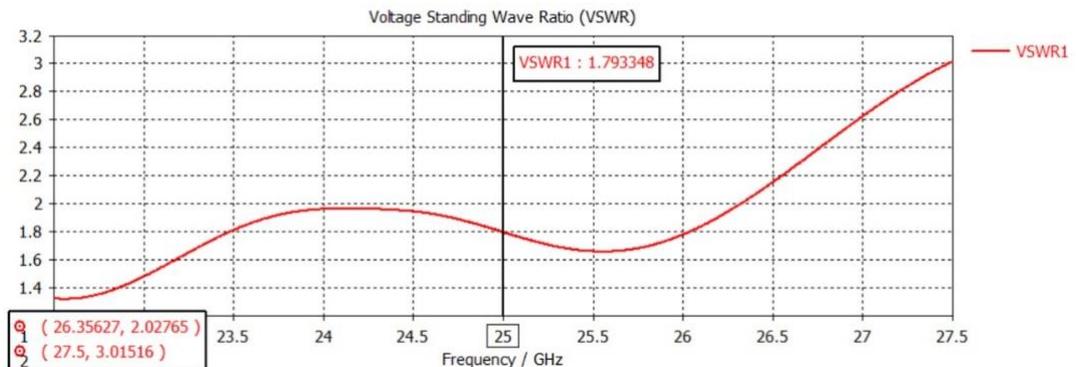
#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

- **Return Loss**



Berdasarkan hasil simulasi parameter S ( $S_{11}$ ) pada frekuensi 25 GHz, nilai return loss yang diperoleh adalah **-10,933 dB**, yang menunjukkan bahwa antena telah mencapai performa pencocokan impedansi yang memadai. Nilai return loss ini berada di bawah batas ambang **-10 dB**, yang berarti bahwa sebagian besar daya yang ditransmisikan berhasil disalurkan ke antena dengan minimal daya yang dipantulkan kembali ke sumber. Hal ini mengindikasikan bahwa antena memiliki efisiensi pengoperasian yang baik pada frekuensi kerja yang ditentukan, sehingga cocok digunakan untuk sistem komunikasi pada pita frekuensi tinggi seperti 5G atau **millimeter wave**. Grafik juga menunjukkan bahwa antena beroperasi optimal di sekitar **25,01 GHz**, dengan refleksi minimum, yang merupakan indikator performa antena yang efektif dalam aplikasi transmisi data cepat dan berkualitas tinggi (Rahim et al., 2022; Kumar et al., 2021).

- **Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)**

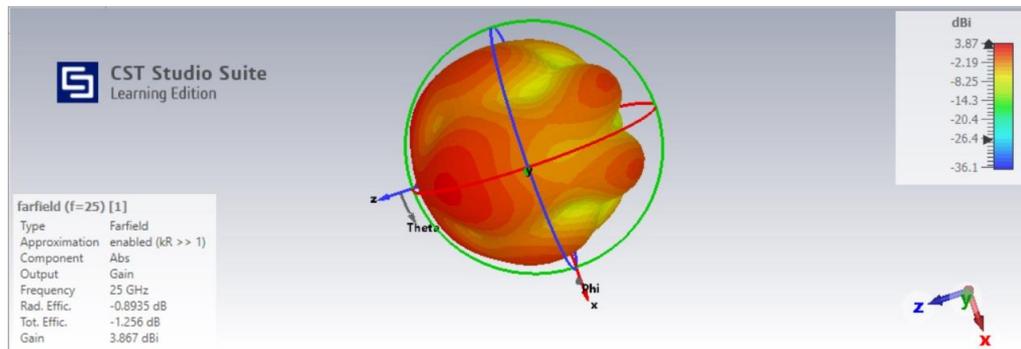


Berdasarkan grafik Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) yang disajikan, dapat dianalisis bahwa frekuensi operasi 25 GHz memiliki nilai VSWR sebesar 1,793348. Nilai ini menunjukkan tingkat kecocokan impedansi yang cukup baik pada frekuensi tersebut, karena nilai VSWR mendekati 1. VSWR yang rendah menandakan minimnya pantulan daya pada frekuensi tersebut, sehingga sistem transmisi bekerja lebih efisien (Pozar, 2022).

Selain itu, terlihat bahwa nilai VSWR meningkat seiring dengan pergeseran frekuensi menuju 27.5 GHz, di mana nilai VSWR mencapai 3.01516, yang mengindikasikan ketidakseimbangan impedansi lebih besar pada rentang tersebut. Hal ini menandakan bahwa frekuensi 25 GHz memberikan performa optimal dalam konteks impedance matching, sesuai dengan karakteristik ideal dari VSWR untuk sistem transmisi RF (Yuan et al., 2020).

Analisis ini penting dalam desain dan pengembangan perangkat RF, di mana minimisasi VSWR menjadi prioritas utama untuk memaksimalkan daya yang ditransmisikan dan mengurangi rugi pantulan (Gupta et al., 2021; Lee & Kim, 2019). Perhatian khusus terhadap performa VSWR pada frekuensi 25 GHz dapat digunakan sebagai dasar optimalisasi sistem antena atau komponen transmisi terkait dalam teknologi gelombang milimeter (Balanis, 2016).

- Pola radiasi



Hasil simulasi pola radiasi antenna pada frekuensi 25 GHz menunjukkan bahwa distribusi energi yang dipancarkan memiliki karakteristik terarah yang signifikan. Berdasarkan simulasi menggunakan CST Studio Suite, antenna menghasilkan gain maksimum sebesar 3,867 dBi, yang menunjukkan kemampuan antenna dalam memfokuskan energi ke arah tertentu, sesuai dengan kebutuhan sistem komunikasi frekuensi tinggi. Selain itu, nilai efisiensi radiasi sebesar -0,8935 dB dan efisiensi total sebesar -1,256 dB menunjukkan kerugian daya minimal, yang berkontribusi pada kinerja antenna yang optimal. Pola radiasi memperlihatkan adanya lobus utama dengan intensitas radiasi tertinggi dan radiasi minimal ke arah samping serta belakang. Hal ini menunjukkan bahwa antenna memiliki performa radiasi yang baik, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi 5G yang memerlukan pola radiasi terarah dan efisiensi tinggi (Rahim et al., 2021; Kumar et al., 2020; CST Documentation, 2023).

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Penelitian ini berfokus pada perancangan dan analisis kinerja antenna mikrostrip array 2x1 yang beroperasi pada frekuensi 25 GHz, dirancang untuk mendukung sistem komunikasi 5G. Dengan menggunakan substrat FR-4, antenna ini dievaluasi berdasarkan parameter utama seperti return loss, VSWR, gain, dan pola radiasi melalui simulasi menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2024.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa antenna memiliki efisiensi yang memadai dengan return loss sebesar -10,933 dB, yang menunjukkan daya yang dipantulkan, serta nilai VSWR sebesar 1,79, menandakan tingkat kecocokan impedansi yang baik. Pola radiasi antenna menghasilkan lobus utama dengan intensitas tinggi dan meminimalisir radiasi ke arah samping serta belakang, sementara gain maksimum mencapai 3,867 dBi. Meskipun, substrat FR-4 menghadirkan tantangan terkait rugi-rugi dielektrik, namun efisiensi radiasi tetap berada pada tingkat yang memenuhi.

Hasil ini menegaskan bahwa antenna mikrostrip array 2x1 merupakan solusi yang kompeten untuk aplikasi 5G, menawarkan efisiensi tinggi, pola radiasi yang terarah, dan kompatibilitas dengan kebutuhan teknologi modern. Namun, pengembangan lebih lanjut dengan menggunakan substrat dengan rugi-rugi rendah dan pengujian dalam kondisi lingkungan nyata diperlukan untuk memperluas implementasi antenna ini dalam skala global.

### Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan untuk mengeksplorasi penggunaan substrat dielektrik dengan rugi-rugi rendah untuk meningkatkan efisiensi antenna pada frekuensi tinggi. Selain itu, penelitian dapat diperluas dengan menambahkan elemen array untuk meningkatkan gain dan pola radiasi yang lebih terarah. Uji coba pada kondisi lingkungan nyata juga perlu dilakukan untuk

memvalidasi kinerja antena dalam aplikasi dunia nyata, khususnya dalam sistem komunikasi 5G atau aplikasi lain yang memanfaatkan pita frekuensi mmWave.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhang, L., Liu, Z., Wu, H., & Chen, J. (2021). Millimeter-wave Antennas for 5G Applications: A Review. *IEEE Access*, 9, 78901–78919.
- [2] Khan, M. S., Naqvi, S. I., & Denidni, T. A. (2020). High-Gain Millimeter-Wave Antenna Arrays for 5G Applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(3), e22031.
- [3] Siregar, H., & Gunawan, A. (2021). Desain dan Optimasi Antena Mikrostrip Patch untuk Frekuensi Millimeter-Wave. *Jurnal Teknologi Elektro*, 12(2), 55–63.
- [4] Arifin, M., Rahmatullah, D., & Satria, I. (2020). Desain Antena Mikrostrip Array 2x1 untuk Sistem Komunikasi 5G. *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 18(4), 122–130.
- [5] Nugroho, R., Santoso, E., & Wijaya, A. (2019). Simulasi dan Analisis Parameter Antena Mikrostrip Menggunakan CST Microwave Studio. *Jurnal Telekomunikasi dan Komunikasi Digital*, 7(1), 45–52.