

RANCANG BANGUN HIGH GAIN - ANTENA MIKROSTRIP 2X4 ARRAY UNTUK SISTEM KOMUNIKASI SELULER 5G

Oleh : Irfan Mujahidin¹, Muhlasah Novitasari Mara², Rizkha Ajeng Rochmatika³, Hery Setijasa⁴

¹²³⁴Teknik Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ssemarang

Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275

E-mail: irfan.mujahidin@polines.ac.id

Abstrak

Pada perkembangan telekomunikasi, permintaan akan konektivitas yang lebih cepat, handal, dan luas semakin meningkat. Generasi kelima (5G) dari teknologi seluler dianggap sebagai tonggak dalam evolusi telekomunikasi karena menjanjikan kecepatan internet yang jauh lebih tinggi, latensi yang rendah, dan kemampuan untuk mendukung jutaan perangkat terhubung dalam lingkungan Internet of Things (IoT). Salah satu komponen kunci dalam implementasi jaringan 5G adalah antena. Antena merupakan elemen penting dalam mentransmisikan dan menerima sinyal radio yang memungkinkan perangkat terhubung ke jaringan seluler. Sehingga, diperlukan antena yang mampu memberikan kinerja optimal dalam hal cakupan, kecepatan, dan kapasitas. Penelitian ini merancang antena mikrostrip array 2x4 dengan gain tinggi pada 3.5 GHz untuk meningkatkan kinerja jaringan seluler 5G. Metodenya yaitu (1) identifikasi karakteristik bahan serta desain antenna menggunakan software CST Microwave Studio, (2) fabrikasi antenna mikrostrip 5G, (3) Pengujian antenna mikrostrip. Hasilnya kinerja antenna memiliki return loss yang rendah, pola radiasi terarah, gain yang tinggi serta bandwidth lebar.

Kata kunci : antena array, 5G, komposit mikrostrip, substrat dielektrik

Abstract

In the development of telecommunications, demand for faster, more reliable and wider connectivity is increasing. The fifth generation (5G) of mobile technology is considered a milestone in the evolution of telecommunications as it promises much higher internet speeds, low latency, and the ability to support millions of connected devices in Internet of Things. One of the key components in implementing a 5G network is the antenna. Antennas are an important element in transmitting and receiving radio signals that allow devices to connect to cellular networks. So, an antenna is needed that is able to provide optimal performance in terms of coverage, speed and capacity. This research designs a 2x4 microstrip array antenna with high gain at 3.5 GHz to improve 5G cellular network performance. The methods are (1) identifying material characteristics and antenna design using CST Microwave Studio software, (2) 5G microstrip antenna fabrication, (3) Microstrip antenna testing. The result is that the antenna performance has low return loss, directional radiation pattern, high gain and wide bandwidth.

Keywords : antena array, 5G, microstrip composite, dielectric substrat

1. Pendahuluan

Di era digital yang berkembang pesat, kebutuhan akan koneksi nirkabel yang cepat dan stabil semakin meningkat. Jaringan Seluler dengan frekuensi 3.5 GHz menjadi solusi yang menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan frekuensi 5G Seluler yang semakin padat. Frekuensi 3.5 GHz menawarkan kapasitas jaringan yang lebih besar dan memungkinkan transfer data dengan kecepatan tinggi, sehingga

ideal untuk aplikasi yang membutuhkan bandwidth besar seperti streaming video, game online, dan konferensi video (Chandramouli et al., 2023; Mujahidin, 2019).

Antena Mikrostrip pada frekuensi 3,5 GHz memainkan peran penting dalam mewujudkan komunikasi nirkabel yang handal. Antena ini memiliki keunggulan seperti ukuran yang kompak, bobot ringan, dan biaya produksi

yang rendah (Ahadi et al., 2022). Namun, dalam merancang Antena Mikrostrip 3,5 GHz dengan performa optimal bukanlah hal yang mudah. Diperlukan optimasi parameter-parameter kunci seperti impedansi, pola radiasi, gain, dan bandwidth untuk memastikan antena dapat bekerja dengan baik dalam jaringan Seluler.

Pada penelitian ini menunjukkan perancangan dan analisis kinerja Antena Mikrostrip pada frekuensi 3.5 GHz untuk digunakan dalam jaringan Seluler. Melalui pendekatan sistematis, kami menjelajahi berbagai konfigurasi dan teknik desain untuk mencapai puncak performa antena (Huang & Lu, 2021). Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan antena yang dapat memberikan komunikasi nirkabel yang kuat, stabil, dan berkecepatan tinggi dalam jaringan Seluler.

2. Landasan Teori

Berikut merupakan beberapa landasan teori terkait penelitian yang telah dilakukan.

2.1 Antena

Antena adalah sebuah perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi gelombang elektromagnetik dan sebaliknya, memungkinkan terjadinya komunikasi nirkabel. Prinsip dasar dari antena didasarkan pada hukum Maxwell yang menjelaskan bahwa medan listrik yang berubah-ubah dapat menghasilkan medan magnet, dan medan magnet yang berubah-ubah dapat menghasilkan medan listrik. Hal ini memungkinkan gelombang elektromagnetik untuk merambat melalui ruang bebas (Ahmadian et al., 2021). Antena berfungsi sebagai transduser, mengubah sinyal listrik dari pemancar menjadi gelombang elektromagnetik yang dapat dipancarkan ke udara dan diterima oleh antena penerima yang kemudian mengubahnya kembali menjadi sinyal listrik.

Desain dan karakteristik antena ditentukan oleh beberapa parameter utama, termasuk frekuensi operasi, impedansi, gain, pola radiasi, dan bandwidth. Frekuensi operasi menentukan pada rentang frekuensi mana antena dapat bekerja secara efektif. Impedansi yang sesuai diperlukan untuk memastikan transfer daya maksimal dan mengurangi

pantulan sinyal (Gram-Hanssen & Darby, 2018). Gain menggambarkan kemampuan antena untuk memfokuskan energi dalam arah tertentu, sedangkan pola radiasi menunjukkan distribusi energi yang dipancarkan oleh antena ke lingkungan sekitarnya. Bandwidth adalah rentang frekuensi di mana antena dapat beroperasi dengan baik. Kesemua parameter ini harus dioptimalkan dalam desain antena untuk memastikan kinerja yang optimal dalam aplikasi yang diinginkan.

2.2 Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip adalah jenis antena yang terdiri dari lapisan patch logam yang dipasang di atas substrat dielektrik dengan ground plane di bagian bawahnya. Patch logam ini biasanya berbentuk persegi, persegi panjang, lingkaran, atau bentuk geometris lainnya. Antena mikrostrip banyak digunakan dalam aplikasi komunikasi nirkabel modern seperti Seluler, Bluetooth, dan sistem komunikasi satelit karena keunggulannya yang mencakup ukuran yang kecil, biaya produksi yang rendah, dan kemampuannya untuk diintegrasikan dengan sirkuit mikrostrip lainnya.

2.3 Substrat Fr-4

Substrat FR4 adalah bahan yang paling umum digunakan dalam pembuatan sirkuit cetak (PCB) dan antena mikrostrip. FR4 adalah singkatan dari "Flame Retardant 4", yang merujuk pada kelas bahan komposit yang terbuat dari kain kaca tenunan dengan epoksi sebagai pengikat. Bahan ini dikenal karena sifatnya yang tahan api, stabilitas termal yang baik, dan sifat mekanis yang kuat, menjadikannya pilihan populer dalam aplikasi elektronik (Ahmadian et al., 2021).

Dalam konteks antena mikrostrip, substrat FR4 memiliki konstanta dielektrik sekitar 4.4 dan faktor rugi yang relatif rendah. Konstanta dielektrik ini berpengaruh pada frekuensi resonansi dan ukuran antena, di mana bahan dengan konstanta dielektrik yang lebih tinggi akan menghasilkan antena dengan ukuran yang lebih kecil untuk frekuensi yang sama (Mujahidin, 2018).

2.4 Antena Array

Antena array adalah konfigurasi yang terdiri dari beberapa elemen antena yang diatur

dalam pola tertentu untuk meningkatkan performa antenna secara keseluruhan. Elemen-elemen antenna ini dapat diatur dalam bentuk linier, planar, atau matriks tiga dimensi, tergantung pada kebutuhan aplikasi. Pengaturan elemen-elemen ini memungkinkan kontrol lebih baik atas pola radiasi, gain, dan directivity, menjadikan antenna array sangat efektif dalam aplikasi komunikasi nirkabel, radar, dan sistem satelit.

Salah satu keunggulan utama dari antenna array adalah kemampuan untuk membentuk dan mengarahkan pola radiasi. Dengan mengatur amplitudo dan fase sinyal yang masuk ke setiap elemen antenna, pola radiasi dapat diarahkan (beamforming) ke arah tertentu, meningkatkan gain dan mengurangi interferensi dari arah lain. Fenomena ini disebut sebagai "adaptive beamforming". Gain yang lebih tinggi dan pola radiasi yang lebih terarah dibandingkan dengan antenna tunggal memungkinkan antenna array memberikan kinerja yang lebih baik dalam hal jarak komunikasi dan kejelasan sinyal.

2.5 Parameter Antena

Return loss adalah ukuran seberapa baik antenna mikrostrip mencocokkan impedansi dengan sistem transmisi, biasanya dinyatakan dalam desibel (dB). Ini menggambarkan jumlah daya yang dipantulkan kembali ke sumber akibat ketidakcocokan impedansi. Return loss yang lebih tinggi (nilai negatif yang lebih besar) menunjukkan pencocokan impedansi yang lebih baik dan lebih sedikit daya yang dipantulkan. Secara umum, return loss sebesar -10 dB atau lebih rendah dianggap memadai, menunjukkan bahwa 90% daya dipancarkan atau diterima oleh antenna, dan hanya 10% yang dipantulkan.

VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) adalah parameter yang menggambarkan seberapa baik antenna mikrostrip mencocokkan impedansi dengan saluran transmisi. VSWR diukur sebagai rasio antara amplitudo gelombang berdiri maksimum dan minimum pada saluran transmisi. Nilai VSWR yang ideal adalah 1:1, yang berarti tidak ada daya yang dipantulkan kembali, dan semua daya ditransmisikan ke antenna. Dalam praktiknya, nilai VSWR antara 1 dan 2 dianggap baik untuk

antenna mikrostrip, menunjukkan pencocokan impedansi yang memadai dan efisiensi tinggi dalam transmisi dan penerimaan sinyal.

Gain adalah parameter yang menunjukkan seberapa baik antenna mikrostrip memfokuskan energi radiasi dalam arah tertentu dibandingkan dengan antenna isotropik (antenna yang memancarkan energi secara merata ke semua arah). Gain diukur dalam dBi (decibels relative to isotropic) dan memberikan indikasi efisiensi antenna dalam memancarkan atau menerima sinyal dalam arah tertentu. Gain yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan antenna untuk memperkuat sinyal dalam arah yang diinginkan, meningkatkan jarak komunikasi dan kualitas sinyal. Gain yang tinggi sangat diinginkan dalam aplikasi komunikasi nirkabel untuk memastikan cakupan area yang luas dan kekuatan sinyal yang memadai (Ahmad et al., 2021).

Dengan memahami dan mengoptimalkan parameter return loss, VSWR, dan gain, desain antenna mikrostrip dapat disesuaikan untuk mencapai kinerja yang optimal sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik. Parameter ini memberikan wawasan penting tentang efisiensi, stabilitas, dan efektivitas antenna dalam berbagai kondisi operasional.

3. Metode

Metode dalam penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

3.1 Desain Matematis

Lebar patch antenna mikrostrip adalah salah satu parameter penting yang menentukan karakteristik antenna, seperti frekuensi resonansi, gain, dan pola radiasi. Berikut adalah beberapa metode untuk menghitung lebar patch antenna mikrostrip:

1. Perhitungan lebar patch (W)

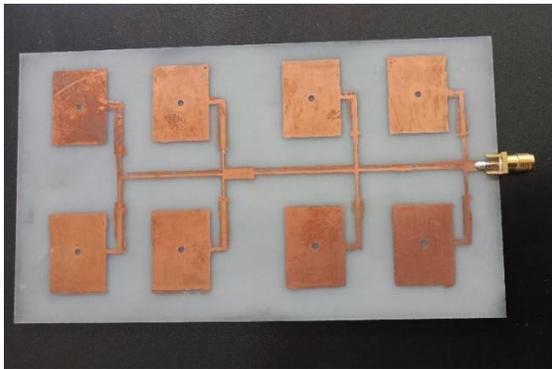
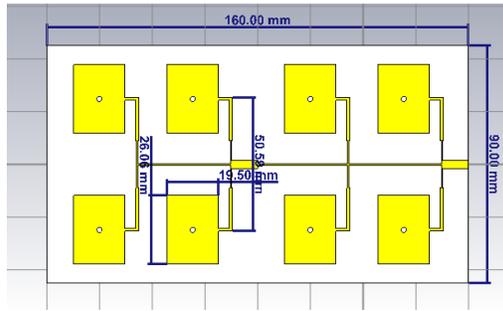
$$W = \frac{c}{2fc} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

2. Perhitungan panjang patch (L)

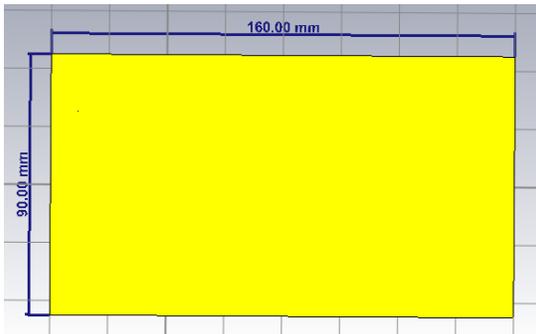
3.2 Desain Software CST

Berikut merupakan desain dari

simulasi software CST pada penelitian antenna array 2x4.



Gambar 1. Desain Antena Mikrostrip Array



Gambar 2. Desain Ground Antena Mikrostrip Array

Tabel 1. Parameter List Antena Mikrostrip Array

Nama	Nilai
Lebar substrak	90
Panjang substrak	80
Tebal substrak	1,6
Tebal tembaga	0,035
Lebar feedline	3,1
Panjang feedline	10
Lebar patch	26,06
Panjang patch	19,5
Lebar feedline 100ohm	18

Nama	Nilai
Panjang feedline 100 ohm	0,59
Lebar feedline 70,7 ohm	16,296
Panjang feedline 70,7 ohm	1,354
Lebar feed 50 ohm	1
Panjang feed 50 ohm	4
Lebar 100 ohm	18
Panjang feed 100 ohm	35

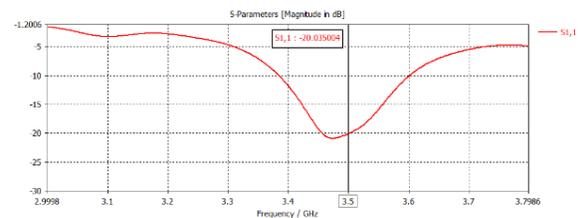
3.3 Parameter Desain

Berikut merupakan beberapa parameter desain antena yang digunakan pada penelitian kali ini.

a. S-Parameter (Return Loss)

S-Parameter merupakan parameter penting dalam menganalisis kinerja antena atau perangkat gelombang mikro lainnya. Pada gambar tersebut, sumbu vertikal mewakili nilai Magnitude S-Parameter dalam dB, sedangkan sumbu horizontal mewakili frekuensi dalam GHz. Plot yang ditampilkan adalah untuk parameter S1,1 yang merupakan koefisien refleksi atau return loss antena.

Return loss menunjukkan seberapa banyak daya yang dipantulkan kembali dari antena. Nilai return loss yang rendah menunjukkan bahwa antena efisien dalam memancarkan daya. Pada gambar, nilai return loss minimum adalah -20.035 dB pada frekuensi 3.5 GHz (Ikram et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa antena memiliki efisiensi yang cukup baik pada frekuensi tersebut. Bandwidth return loss yang lebih lebar menunjukkan bahwa antena dapat beroperasi pada rentang frekuensi yang lebih luas. Pada gambar 4, bandwidth return loss -10 dB adalah sekitar 200 MHz (Antons et al., 2020; Mujahidin, 2020b).



Gambar 4. Hasil Pengujian S-Parameters

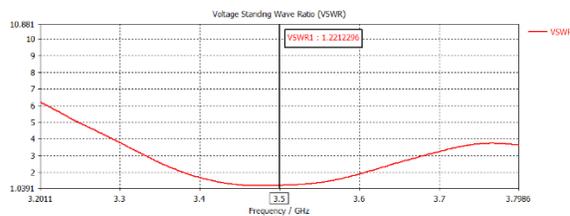
b. VSWR

Gambar 5 menunjukkan plot Voltage

Standing Wave Ratio (VSWR) terhadap frekuensi dalam GHz. VSWR adalah parameter penting dalam menganalisis kinerja antenna atau perangkat gelombang mikro lainnya dan berkaitan erat dengan return loss. VSWR merupakan rasio antara amplitudo maksimum dan minimum dari gelombang berdiri pada saluran transmisi. Nilai VSWR yang ideal adalah 1, yang menunjukkan tidak ada pantulan daya dan transfer daya maksimum ke antenna. Semakin besar nilai VSWR, semakin besar pantulan daya yang terjadi karena ketidakcocokan impedansi.

Nilai VSWR minimum yang tertera pada grafik adalah 1.12211196 pada frekuensi 3.45 GHz. Nilai VSWR yang rendah menunjukkan bahwa matching impedansi antara antenna dan sumber sinyal (misalnya, transmitter) cukup baik pada frekuensi tersebut. Secara umum, nilai VSWR yang lebih kecil dari 2 dianggap baik untuk antenna, sedangkan nilai VSWR antara 2 dan 3 masih dapat diterima untuk beberapa aplikasi (Bahhar et al., 2020).

Bandwidth VSWR yang lebih lebar menunjukkan bahwa antenna dapat beroperasi pada rentang frekuensi yang lebih luas dengan matching impedansi yang baik. Pada gambar, bandwidth VSWR -2 dB adalah sekitar 200 MHz. Berdasarkan analisis VSWR, antenna 3.5 GHz memiliki matching impedansi yang cukup baik dan dapat beroperasi pada rentang frekuensi sekitar 200 MHz di sekitar frekuensi tersebut.

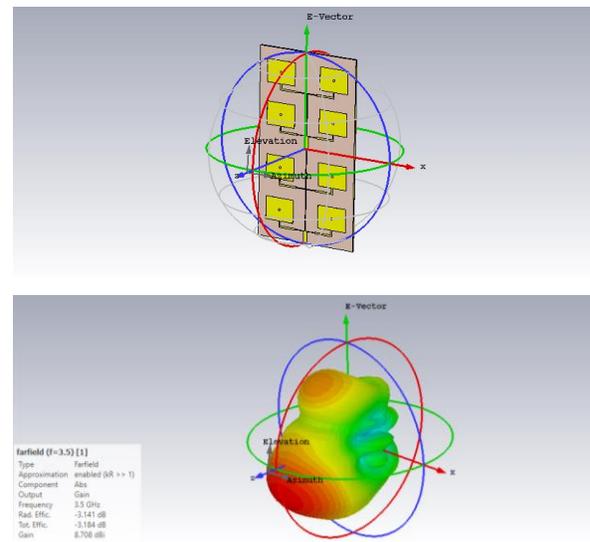


Gambar 5. Hasil Pengujian VSWR

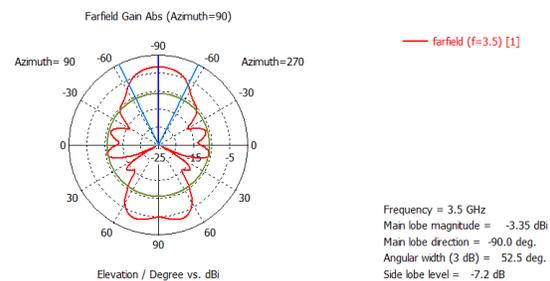
c. Farfields (gain)

Pola merupakan representasi grafis dari distribusi intensitas radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh antenna. Pola radiasi ini sangat penting dalam mengevaluasi kinerja antenna dan memastikan antenna dapat memancarkan atau menerima sinyal dengan

baik pada arah yang diinginkan. Dalam gambar tersebut, sumbu vertikal mewakili bidang theta (θ), sedangkan sumbu horizontal mewakili bidang phi (ϕ). Warna-warna yang berbeda menunjukkan tingkat intensitas radiasi, dengan warna merah menunjukkan intensitas radiasi yang lebih tinggi dan warna hijau menunjukkan intensitas radiasi yang lebih rendah. Pada hasil pola radiasi antenna tersebut menunjukkan gain 8.708 dBi, dimana hasil tersebut sudah sesuai untuk desain antenna microstrip.



Gambar 6. Hasil Pengujian Gain



Gambar 7. Hasil Pengujian Polarisasi

3.4 Fabrikasi Antena

Pada fabrikasi antenna microstrip 3.5 GHz, proses diawali dengan pencetakan desain antenna pada kertas CTS menggunakan printer laser. Selanjutnya, setrika kertas atas desain antenna tersebut pada PCB yang telah diampelas (AlSabbagh et al., 2020). Setelah itu, rendam dengan air agar mempermudah proses pelepasan kertas, juga dapat meminimalisir kegagelan, apabila terdapat bagian yang hilang

terkelupas, dapat ditutupi dengan menggunakan spidol permanen. Langkah berikutnya adalah menyiapkan larutan perbandingan HCL, H₂O₂, dan H₂O 1:2:3.

Kemudian larutkan PCB dan bilas dengan air mengalir. Bersihkan tinta spidol dengan tinner. Langkah terakhir pasang port pada jalur PCB dengan menggunakan solder dan timah. Fabrikasi dengan cara ini digunakan karena prosedurnya yang relative lebih sederhana dan mudah dilakukan. Namun dengan metode ini juga dapat mengurangi kesetabilan dari sinyal yang dihasilkan.

3.5 Hasil dan Pembahasan

Dalam pembuatan desain antenna microstrip dengan frekuensi 5.8 GHz, optimasi dan perubahan dimensi pada desain antenna microstrip menggunakan software CTS Studio memiliki dampak dalam mencapai frekuensi yang diharapkan. Berikut beberapa dampak yang terjadi :

- a. Impedansi Matching
Mengatur dimensi (panjang/lebar patch) dapat menyesuaikan impedansi antena dengan saluran transmisi, meningkatkan efisiensi transfer sinyal.
- b. Return Loss dan VSWR
Optimasi dimensi dapat memperbaiki nilai return loss (daya pantul) dan menurunkan VSWR (efisiensi transmisi) mendekati nilai ideal.
- c. Pola Radiasi dan Gain
Dimensi antena memengaruhi pola radiasi (arah dan bentuk distribusi daya) dan gain (perbandingan daya radiasi dengan antena isotropik). Optimasi dimensi dapat meningkatkan gain dan memperbaiki pola radiasi.
- d. Bandwidth
Mengubah dimensi dapat memperluas bandwidth antena, memungkinkannya bekerja pada rentang frekuensi yang lebih luas.
- e. Polarisasi
Dimensi antena memengaruhi polarisasi (misalnya, vertical / horizontal). Optimasi dimensi dapat memastikan polarisasi yang sesuai dengan sistem komunikasi.

Berdasarkan hasil pembuatan desain antenna array microstrip dengan frekuensi 3.5

GHz yang telah dilakukan berdasarkan ketentuan yang diharapkan mendapatkan hasil parameter yang dapat diuraikan sebagai berikut :

- Panjang Patch sekitar 9 cm
- Lebar Patch sekitar 16 cm
- Tebal Substrat sekitar 1.6 mm

Dapat dianalisa dari hasil pengujian dimana frekuensi yang dihasilkan 3.472 GHz dari target yang akan dicapai 3.5 GHz, dengan begitu selisihnya sekitar 0,028GHz maka dimensi tersebut sudah mendekati optimal. Nilai magnitude sebesar -20.879612 dB, dapat dikatakan baik karna lebih kecil dari -10, maka magnitude dapat dikatakan cukup baik. Selanjutnya, pada nilai VSWR sebesar 1.1986937 maka dapat dikatakan efisiensi transmisi cukup baik. Nilai gain yang dihasilkan sebesar 8.708 dBi yang dapat dikatakan baik pula karena jauh dari nilai minimal gain yaitu 6 dBi. Dengan cara membuat nilai baru sebagai nilai optimasi maka hasil yang sebelumnya sangat jauh dari target dapat menghasilkan hasil yang hampir sesuai target.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian mengenai antena array microstrip ini adalah:

- a. Antena Mikrostrip Array 2x4 dapat memberikan kinerja optimal dalam jaringan 4G LTE, 5G, FWA, Point-to-point, dan private LTE
- b. Frekuensi yang dihasilkan adalah 3.472 GHz, mendekati target 3.5 GHz dengan selisih sekitar 0.028 GHz, yang menunjukkan dimensi sudah mendekati optimal
- c. Magnitude sebesar -20.879612 dB, menunjukkan kinerja yang baik karena lebih kecil dari -10 dB.
- d. VSWR sebesar 1.1986937, menunjukkan efisiensi transmisi yang baik.
- e. Gain yang dihasilkan sebesar 8.708 dBi, melebihi minimal gain yang diharapkan yaitu 6 dBi.
- f. Dari beberapa hasil yang telah disebutkan, maka dapat disimpulkan hasil desain antena secara keseluruhan sudah cukup sesuai dengan target yang diharapkan dengan optimasi yang telah dilakukan.
- g. Pada fabrikasi antena microstrip 3.5 GHz, meskipun metode pencetakan desain menggunakan printer laser pada kertas CTS

serta transfer menggunakan setrika ke PCB dapat memberikan pendekatan yang sederhana dan praktis. Terdapat beberapa pertimbangan penting yang perlu diperhatikan. Proses merendam PCB dalam air untuk memudahkan pelepasan kertas CTS dan penggunaan spidol permanen untuk menutupi kerusakan pada desain menunjukkan fleksibilitas dalam menangani masalah produksi yang mungkin timbul.

Namun, proses etsa menggunakan larutan HCL, H₂O₂, dan H₂O serta pembersihan dengan tinner memerlukan pengawasan ketat untuk menghindari kerusakan atau kontaminasi yang dapat mempengaruhi kinerja antenna. Terakhir, pemasangan port dengan solder dan timah menyoroti pentingnya keterampilan dalam manipulasi komponen mikroelektronik

- h. Berdasarkan pengukuran menggunakan NANO VNA pada frekuensi 3.5 GHz, hasil menunjukkan bahwa antenna ini memiliki karakteristik yang sangat menguntungkan untuk aplikasi komunikasi nirkabel. Return loss yang rendah pada nilai -20.035004 dB menandakan bahwa antenna memiliki kesesuaian impedansi yang sangat baik pada frekuensi pusat yang dituju. Hal ini mengindikasikan bahwa hanya sedikit energi yang dipantulkan kembali ke sumber, sehingga sebagian besar daya yang dihasilkan dari sumber dapat disalurkan secara efisien ke antenna. Dengan VSWR yang mendekati nilai ideal, yaitu 1, antenna juga menunjukkan efisiensi transmisi yang tinggi, di mana kehilangan daya karena pantulan kembali minim.
- i. Grafik polaradiasi menyoroti pola radiasi antenna pada frekuensi 3.5 GHz, dengan lobus utama yang terfokus pada arah -90.0 derajat. Magnitudo lobus utama sebesar -3.35 dBi menunjukkan kekuatan pancaran sinyal utama, sementara lebar sudut pada -3 dB mencapai 52.5 derajat, menunjukkan seberapa luas sinyal dipancarkan dari arah utama ini. Tingkat lobus samping yang rendah pada -7.2 dB menunjukkan bahwa antenna memiliki kemampuan yang baik untuk meminimalkan interferensi dari arah samping, yang penting untuk aplikasi yang

memerlukan directivity tinggi dan presisi dalam penyaluran sinyal.

5. Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih kepada **Pusat Penelitian Pengabdian Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Semarang Tahun Anggaran 2024** atas dukungan finansial melalui kegiatan Penelitian Terapan skema Pratama (PTP).

Daftar Pustaka

- Abriyanti, M. J., Wahyudi, E., Amanaf, M. A., & Studi, P. (2021). Perancangan Jaringan Transmisi Microwave Dengan Double Passive Repeater Menggunakan Pathloss 5.0. *JTET(Jurnal Teknik Elektro Terapan)*, 9(2).
- Afridi, M. A. (2015). Microstrip Patch Antenna – Designing at 2.4 GHz Frequency. *Biological and Chemical Research*.
- Ahadi, M., Roudjane, M., Dugas, M. A., Miled, A., & Messaddeq, Y. (2022). Wearable Sensor Based on Flexible Sinusoidal Antenna for Strain Sensing Applications. *Sensors*, 22(11).
- Ahasan, S. R., Islam, K., Khan, M. M., Masud, M., Gaba, G. S., & Alhumyani, H. A. (2021). Novel compact UWB band notch antenna design for body-centric communications. *Computer Systems Science and Engineering*, 40(2).
- Ahmad, S., Paracha, K. N., Sheikh, Y. A., Ghaffar, A., Butt, A. D., Alibakhshikenari, M., Soh, P. J., Khan, S., & Falcone, F. (2021). A Metasurface-Based Single-Layered Compact AMC-Backed Dual-Band Antenna for Off-Body IoT Devices. *IEEE Access*, 9.
- Ahmadian, A., Shin, W., & Park, H. (2021). Max-min throughput optimization in fdd multiantenna wirelessly powered iot networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(7).
- Aina, T. S. (2022). Investigation on Performance of Microstrip Patch Antenna for a Practical Wireless Local Area Network (WLAN) Application. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(1).
- AlSabbagh, H. M., Elwi, T. A., Al-Naiemy, Y., & Al-Rizzo, H. M. (2020). A compact triple-band metamaterial-inspired antenna

- for wearable applications. *Microwave and Optical Technology Letters*.
- Antons, D., Grünwald, E., Cichy, P., & Salge, T. O. (2020). *The application of text mining methods in innovation research: Current state, evolution patterns, and development priorities*. R and D Management.
- Asif, H. M. (2020). Analysis of space time block codes and cosets for 5G and its applications. *Computer Communications*.
- Bahhar, C., Baccouche, C., & Sakli, H. (2020). *A Novel 5G Rectenna for IoT applications*. Proceedings - STA 2020: 2020 20th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering.
- Chandramouli, D., Andres-Maldonado, P., & Kolding, T. (2023). Evolution of Timing Services From 5G-A Toward 6G. *IEEE Access*, 11. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3265213>
- Fallah-Arani, H., Baghshahi, S., Sedghi, A., Stornaiuolo, D., Tafuri, F., Massarotti, D., & Riahi-Noori, N. (2018). The influence of heat treatment on the microstructure, flux pinning and magnetic properties of bulk BSCCO samples prepared by sol-gel route. *Ceramics International*, 44(5), 5209–5218.
- Gram-Hanssen, K., & Darby, S. J. (2018). “Home is where the smart is”? Evaluating smart home research and approaches against the concept of home. *Energy Research and Social Science*.
- Huang, H. C., & Lu, J. (2021). Evolution of Innovative 5G Millimeter-Wave Antenna Designs Integrating Non-Millimeter-Wave Antenna Functions Based on Antenna-in-Package (AiP) Solution to Cellular Phones. *IEEE Access*, 9.
- Ikram, M., Sultan, K. S., Abbosh, A. M., & Nguyen-Trong, N. (2022). Sub-6 GHz and mm-Wave 5G Vehicle-to-Everything (5G-V2X) MIMO Antenna Array. *IEEE Access*, 10.
- Maruthi, S. P., & Panigrahi, T. (2020). Robust mixed source localization in WSN using swarm intelligence algorithms. *Digital Signal Processing: A Review Journal*.
- Mujahidin, I. (2018). Desain Matematis Antena Mikrostrip. [Http://Antenapropagasi.Blogspot.Com/2016/02/Desain-Matematis-Antena-Mikrostrip_17.Html](http://Antenapropagasi.Blogspot.Com/2016/02/Desain-Matematis-Antena-Mikrostrip_17.Html).
- Mujahidin, I. (2019). DIRECTIONAL 1900 MHZ SQUARE PATCH RING SLOT MICROSTRIP ANTENNA FOR WCDMA. *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science)*.
- Mujahidin, I. (2020a). A Compact 5.8 GHz CPW Double Square Edge Antenna With BPF Stepped Impedance Resonator. *PRotek: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*.
- Mujahidin, I. (2020b). Characterization of 5.5 GHz High Gain Microstrip 2x2 Array Antenna. *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science)*.
- Mujahidin, I. (2020c). Performance of Face to Face Absorption Signal on 2.4 GHz Low Profile Material Antenna. *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science)*.