

Pengembangan Antena Mikrostrip *Rectangular Array* Untuk Komunikasi Sistem Monitoring Loker Otomatis Berbasis RFID

Development of Rectangular Microstrip Antenna Array for RFID-Based Automatic Locker Monitoring System Communication

Yosy Rahmawati^{*1}, Luh Krisnawati², Muhammad Raihan³

^{1,2}*Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta
Kota Depok, Jawa Barat, Indonesia*

³*Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Kota Cilegon, Banten, Indonesia*

^{*1}Corresponding author : yosy.rahmawati@upnvj.ac.id
²luhkrisnawati@upnvj.ac.id, ³muhammadraihan2252@gmail.com

Received on 10-07-2025, accepted on 30-07-2025, published on 30-07-2025

Abstrak

Penelitian ini membahas perancangan dan optimasi antena mikrostrip rectangular array yang beroperasi pada frekuensi 2,4 GHz untuk kebutuhan sistem monitoring loker berbasis RFID. Optimasi dilakukan untuk meningkatkan kinerja antena berdasarkan parameter utama seperti return loss, VSWR, impedansi, bandwidth, gain, dan pola radiasi. Hasil simulasi dan pengukuran menunjukkan peningkatan signifikan setelah optimasi. Nilai return loss membaik dari -46,5 dB menjadi -27,6 dB, dengan penurunan VSWR dari 4,964 menjadi 1,000, menandakan pencocokan impedansi yang sangat baik terhadap sistem 50 Ω . Bandwidth meningkat dari 94,2 MHz menjadi 126,3 MHz, melampaui batas minimum ISO/IEC 18000-4 untuk RFID 2,4 GHz. Pola radiasi menunjukkan arah utama pada sudut 2° dengan gain maksimum 4,91 dBi dan side lobe level -14,2 dB. Hasil pengujian membuktikan bahwa antena yang telah dioptimasi memenuhi spesifikasi teknis dan layak diimplementasikan dalam aplikasi RFID berbasis fixed reader secara efisien. Hasil pengujian membuktikan bahwa antena yang telah dioptimasi memenuhi spesifikasi teknis dan layak diimplementasikan dalam aplikasi RFID berbasis fixed reader secara efisien. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang hanya berbasis simulasi atau antena tunggal, penelitian ini mengembangkan dan menguji antena array 1×2 secara nyata untuk sistem monitoring loker RFID aktif berbasis 2,4 GHz.

Kata kunci : Antena Mikrostrip, Bandwidth, ISO/IEC 18000-4, Return Loss, RFID 2,4 GHz, VSWR

Abstract

This study discusses the design and optimization of a rectangular array microstrip antenna operating at 2.4 GHz for use in an RFID-based locker monitoring system. The optimization process was carried out to enhance antenna performance based on key parameters such as return loss, VSWR, impedance, bandwidth, gain, and radiation pattern. Simulation and measurement results show significant improvement after optimization. The return loss improved from -46.5 dB to -27.6 dB, while the VSWR decreased from 4.964 to 1.000, indicating excellent impedance matching to a 50 Ω system. The bandwidth increased from 94.2 MHz to 126.3 MHz, exceeding the minimum requirement specified in ISO/IEC 18000-4 for 2.4 GHz RFID applications. The radiation pattern exhibits a main lobe at 2° with a maximum gain of 4.91 dBi and a side lobe level of -14.2 dB. These results demonstrate that the optimized antenna meets technical standards and is highly suitable for efficient implementation in fixed RFID reader systems. These results demonstrate that the optimized antenna meets technical standards and is highly suitable for efficient implementation in fixed RFID reader systems. Unlike previous studies that relied on simulation or single-element designs, this work presents a fabricated and measured 1×2 array antenna tailored for a real-world 2.4 GHz RFID locker monitoring system.

Keywords : Microstrip Antenna, Bandwidth, ISO/IEC 18000-4, Return Loss, RFID 2.4 GHz, VSWR

I. PENDAHULUAN

Dalam era digital dan perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT), kebutuhan akan sistem monitoring otomatis semakin meningkat di berbagai sektor, termasuk dalam manajemen fasilitas seperti loker pintar. Salah satu solusi teknologi yang banyak digunakan dalam sistem ini adalah *Radio Frequency Identification* (RFID), yang memungkinkan identifikasi dan pelacakan objek secara otomatis dan nirkabel tanpa kontak langsung [1]. Penggunaan RFID dalam sistem monitoring loker tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga memberikan keamanan dan kenyamanan bagi pengguna. Secara umum, sistem RFID dapat beroperasi pada berbagai pita frekuensi seperti *Low Frequency* (LF), *High Frequency* (HF), dan *Ultra High Frequency* (UHF). Namun, dalam beberapa implementasi modern terutama yang terintegrasi dengan sistem komunikasi berbasis Wi-Fi dan IoT RFID juga dapat bekerja pada pita frekuensi ISM 2,4 GHz. Penggunaan RFID aktif berbasis 2,4 GHz ini memungkinkan komunikasi jarak menengah hingga jauh dengan latensi rendah dan integrasi yang fleksibel ke dalam sistem pemantauan *real-time*. Maka dari itu, dalam konteks sistem monitoring loker otomatis, pemanfaatan RFID 2,4 GHz menjadi pendekatan yang menjanjikan.

Salah satu komponen vital dalam sistem RFID adalah antenna, yang bertanggung jawab dalam proses transmisi dan penerimaan sinyal antara *tag* dan *reader*. Kinerja antenna secara langsung memengaruhi kualitas komunikasi data, jangkauan sistem, serta efisiensi energi secara keseluruhan [2]. Oleh karena itu, desain antenna yang optimal menjadi krusial, khususnya pada aplikasi RFID yang menuntut kinerja tinggi dalam ruang terbatas seperti sistem loker otomatis. Antena mikrostrip menjadi pilihan populer karena bentuknya yang ringkas, ringan, *planar*, serta mudah diintegrasikan ke dalam perangkat portabel [3]. Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan desain antenna mikrostrip untuk aplikasi RFID dan komunikasi nirkabel berbasis 2,4 GHz. Pada penelitian [4] merancang dan memfabrikasi antenna *array* 1×2 dan 1×4 berbasis substrat FR-4, dengan hasil *gain* hingga 5,82 dBi dan VSWR sekitar 1,15, menunjukkan performa yang stabil dan cocok untuk WLAN dan IoT. Lalu, penelitian [5] mensimulasikan konfigurasi *array* 4×1 dan 8×1 , menghasilkan *gain* maksimum 9,24 dBi dan *bandwidth* sebesar 129 MHz, meskipun pengujiannya terbatas pada simulasi saja.

Penelitian [6] melakukan desain antenna *patch* tunggal 2,4 GHz dengan *return loss* $-36,7$ dB dan *bandwidth* 104 MHz, namun tanpa konfigurasi *array*. Sementara itu, penelitian [7] merancang antenna *patch* sederhana dengan *gain* 1,48 dBi dan *return loss* -25 dB, menunjukkan efisiensi radiasi baik meski dengan cakupan terbatas. Selain itu, pada penelitian [8] mengembangkan antenna mikrostrip berbasis *meander line* untuk aplikasi IoT, berfokus pada peningkatan *bandwidth* namun belum menerapkan konfigurasi *array*. Berdasarkan latar belakang tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun banyak upaya telah dilakukan untuk mengoptimalkan *gain*, *return loss*, dan *bandwidth* antenna 2,4 GHz, sebagian besar penelitian masih terbatas pada desain antenna tunggal, uji simulasi, atau belum terfokus pada integrasi nyata dengan sistem monitoring RFID aktif berbasis 2,4 GHz.

Dengan demikian, penelitian ini diarahkan untuk merancang dan mengoptimalkan antenna mikrostrip *rectangular array* konfigurasi 1×2 , yang tidak hanya memenuhi parameter teknis seperti *gain*, *return loss*, VSWR, dan *bandwidth*, tetapi juga cocok untuk diintegrasikan ke dalam sistem monitoring loker otomatis berbasis RFID 2,4 GHz secara praktis dan efisien. Berbeda dari penelitian sebelumnya, studi ini tidak hanya melakukan simulasi tetapi juga melakukan fabrikasi dan pengukuran nyata antenna *rectangular array* 1×2 yang dirancang khusus untuk sistem monitoring loker RFID aktif 2,4 GHz secara aplikatif. Berbeda dari penelitian sebelumnya, studi ini tidak hanya melakukan simulasi tetapi juga melakukan fabrikasi dan pengukuran nyata antenna *rectangular array* 1×2 yang dirancang khusus untuk sistem monitoring loker RFID aktif 2,4 GHz secara aplikatif.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Studi Literatur

Dalam beberapa tahun terakhir, desain antenna mikrostrip pada frekuensi 2,4 GHz semakin banyak dikembangkan seiring meningkatnya kebutuhan sistem RFID dan IoT yang efisien, kompak, dan memiliki jangkauan komunikasi memadai. Pada penelitian [4] merancang dan memfabrikasi antenna *array* 1×2 dan 1×4 pada substrat FR-4, dengan *gain* mencapai 5,82 dBi dan nilai VSWR sekitar 1,15, yang menunjukkan performa cukup baik dalam aplikasi praktis. Lalu, penelitian [5] memodelkan konfigurasi *array* 4×1 hingga 8×1 secara simulatif dan mencatat *gain* hingga 9,24 dBi serta *bandwidth* sekitar 129 MHz, meskipun belum dilakukan fabrikasi nyata.

Kemudian, penelitian [9] berfokus pada antenna *circular array* 2×1 dan 4×1 untuk aplikasi RFID *reader* berbasis IoT, menunjukkan peningkatan *gain* signifikan dengan *bandwidth* antara 45–51 MHz. Sementara

itu, penelitian [6] merancang *patch* antenna tunggal dengan *gain* 2,7 dBi dan *return loss* -36,7 dB yang sangat rendah, serta *bandwidth* mencapai 104 MHz menandakan efisiensi radiasi yang tinggi dalam struktur sederhana. Penelitian [7] dan [10] juga mengembangkan antenna *patch* 2,4 GHz berbasis simulasi dengan hasil *gain* antara 1,48 hingga 7 dBi, dan *return loss* lebih baik dari -25 dB.

Penelitian [8] mengeksplorasi desain antenna *meander line* untuk aplikasi IoT berbasis 2,4 GHz, dengan fokus pada optimalisasi *bandwidth*, sedangkan penelitian [11] memberikan tinjauan menyeluruh terhadap berbagai bentuk *patch* antenna (*rectangular*, *circular*, *slot*) dan pengaruhnya terhadap *gain*, *bandwidth*, dan parameter pencocokan impedansi seperti VSWR dan *return loss*. Penelitian-penelitian tersebut secara umum menyoroti pentingnya konfigurasi array dalam meningkatkan *gain* dan *bandwidth*, namun sebagian besar masih terbatas pada simulasi atau belum diarahkan pada integrasi sistem RFID secara fungsional.

Dari sisi penerapan, seperti penelitian [12] dan [13] mengarah pada desain antenna *reader* RFID dalam konteks komunikasi jarak dekat, namun belum spesifik mengangkat sistem monitoring otomatis seperti loker. Beberapa pendekatan eksperimental terbaru, seperti penggunaan antenna hasil cetak 3D atau teknik *inset-fed*, juga mulai bermunculan namun masih jarang diuji pada skenario RFID aktif secara menyeluruh.

Dari berbagai literatur tersebut, terlihat bahwa *gap* penelitian masih terbuka pada perancangan antenna mikrostrip *rectangular array* dengan konfigurasi minimal (1×2) yang difabrikasi dan diuji secara nyata dalam sistem RFID aktif 2,4 GHz, khususnya untuk aplikasi monitoring loker otomatis. Penelitian ini diarahkan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan mengembangkan antenna mikrostrip 1×2 yang ringkas namun memiliki performa yang stabil, melalui proses desain, simulasi berbasis CST Studio, hingga fabrikasi dan pengujian parameter *gain*, VSWR, *return loss*, dan *bandwidth*.

B. Dasar Teori

- Antena Mikrostrip

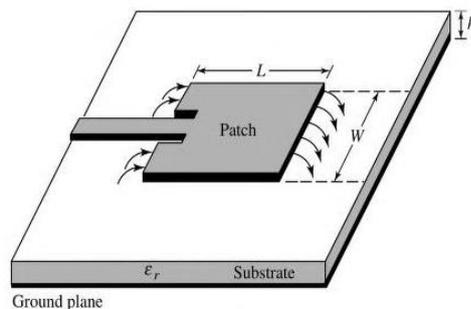
Antena mikrostrip merupakan jenis antenna planar yang terdiri dari elemen *patch* logam tipis yang diletakkan di atas lapisan substrat dielektrik dan memiliki *ground plane* di bagian bawahnya. *Patch* biasanya terbuat dari tembaga atau emas dan dapat berbentuk persegi panjang, lingkaran, atau bentuk lainnya tergantung pada aplikasi dan karakteristik yang diinginkan. Antena ini populer dalam aplikasi komunikasi modern karena ukurannya yang kompak, ringan, serta kemudahan integrasi dengan rangkaian elektronik lainnya [14].

Keunggulan utama antenna mikrostrip meliputi desain yang ramping dan ringan, kemudahan dalam fabrikasi menggunakan teknik *photolithography*, serta sifat konformal yang memungkinkan dipasang pada permukaan melengkung, seperti badan pesawat atau perangkat portabel [15]. Hal ini menjadikan antenna mikrostrip sangat cocok untuk digunakan dalam sistem komunikasi bergerak, perangkat IoT, radar, dan aplikasi RFID.

Selain itu, antenna ini juga mendukung konfigurasi array untuk meningkatkan *gain* dan *directivity*. Namun demikian, antenna mikrostrip juga memiliki keterbatasan, di antaranya *bandwidth* yang relatif sempit, efisiensi radiasi yang rendah, serta nilai *gain* dan *directivity* yang terbatas jika dibandingkan dengan antenna konvensional lainnya. Upaya untuk meningkatkan performa antenna ini sering dilakukan dengan rekayasa bentuk *patch*, pemilihan substrat dengan *permittivitas* rendah, dan konfigurasi *array* [16].

- Struktur Dasar Antena Mikrostrip

Struktur dasar antenna mikrostrip yaitu *patch*, *substrate*, dan *ground plane*. Lapisan konduktor atas atau *patch* berfungsi sebagai sumber radiasi dimana energi elektromagnetik menyusur tepian dari sisi *patch* ke dalam substrat. Lapisan bawah bertindak sebagai bidang *ground* pemantulan sempurna, mengembalikan energi melalui substrat menuju udara bebas, dan substrat berfungsi sebagai media penyalur gelombang elektromagnetik dari sistem pencatuan. Struktur dasar antenna mikrostrip ditunjukkan pada Gambar 1 [14].



Gambar 1. Struktur Dasar Antena Mikrostrip [14]

- Perhitungan Dimensi Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip *rectangular array* adalah antena berbasis substrat dielektrik yang terdiri dari beberapa elemen *patch* persegi panjang yang disusun dalam *array* untuk meningkatkan *gain* dan *directivity*. Langkah-langkah perhitungan dimensi antena mikrostrip *rectangular array* sebagai berikut :

1. *Lebar Patch* (W)

Digunakan untuk menghitung lebar antena mikrostrip berdasarkan frekuensi kerja, konstanta dielektrik, dan kecepatan ruang hampa [14].

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

2. Konstanta Dielektrik Efektif (ϵ_{eff})

Digunakan untuk menghitung konstanta dielektrik efektif yang memperhitungkan efek substrat pada medan listrik [14], [17].

$$\epsilon_{eff} = \frac{2\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-0.5} \quad (2)$$

3. Panjang Efektif Patch (L_{eff})

Panjang efektif dari *patch* dihitung menggunakan konstanta dielektrik efektif. Konstanta efektif ini memperhitungkan perubahan medan listrik karena substrat dielektrik.

$$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

4. Panjang Tambahan (ΔL)

Panjang tambahan muncul karena medan elektromagnetik menyebar di luar *patch*. Bergantung pada tinggi *substrate* dan lebar *patch*[17], [18].

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(hW + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(hW + 0.8)} \quad (4)$$

5. Panjang *Patch* (L)

Panjang aktual *patch* dikoreksi dengan panjang tambahan untuk memperhitungkan *fringing effect*.

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

6. Panjang *Ground Plane* (L_g)

Panjang *ground plane* (bidang tanah) dihitung dengan menambahkan margin sebesar $6h$ ke panjang *patch*.

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

7. Lebar *Ground Plane* (W_g)

Lebar *ground plane* dihitung dengan menambahkan margin sebesar $6h$ ke lebar *patch*.

$$W_g = 6h + W \quad (7)$$

Simbol W menyatakan lebar *patch* antena, sedangkan L adalah panjang *patch* aktual setelah dikoreksi oleh efek *fringing*. L_{eff} menunjukkan panjang efektif *patch* yang diperoleh berdasarkan konstanta dielektrik efektif (ϵ_{eff}), yang merepresentasikan pengaruh substrat terhadap distribusi medan listrik di sekitar *patch*. Nilai ΔL adalah panjang tambahan akibat efek *fringing*, yaitu penyebaran medan elektromagnetik di luar batas fisik *patch*. Ukuran *ground plane* ditentukan oleh W_g / lebar *ground* dan L_g / panjang *ground*, yang masing-masing diturunkan dari ukuran *patch* dengan penambahan *margin* tertentu. Sementara itu, ϵ_r merepresentasikan konstanta dielektrik relatif dari material substrat (misalnya FR-4), dan h adalah ketebalan substrat. Frekuensi kerja antena dilambangkan dengan f (dalam satuan Hz), sedangkan c merupakan kecepatan cahaya di ruang hampa sebesar 3×10^8 m/s.

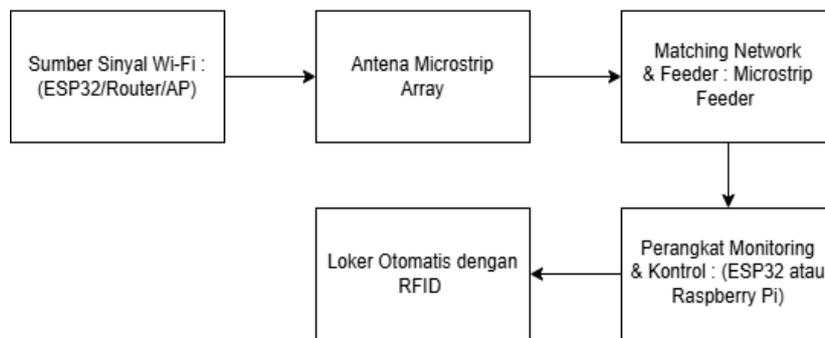
III. METODE PENELITIAN

A. Blok Diagram Sistem Monitoring Loker Otomatis

Dalam era digital saat ini, sistem komunikasi nirkabel menjadi komponen penting dalam berbagai aplikasi, termasuk sistem monitoring loker otomatis. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi komunikasi dalam sistem ini adalah antena mikrostrip *rectangular array* yang

bekerja pada frekuensi Wi-Fi 2,4 GHz. Pada Gambar 1 merupakan diagram blok yang digunakan dalam perancangan antenna mikrostrip *rectangular array* untuk komunikasi sistem monitoring loker otomatis berbasis RFID. Antena ini berperan sebagai pemancar dan penerima sinyal antara perangkat monitoring dan loker otomatis berbasis RFID, memastikan transfer data yang cepat dan stabil. Dengan desain yang ringkas, ringan, serta mudah diintegrasikan dengan perangkat elektronik lain, antenna mikrostrip menjadi pilihan ideal dalam implementasi sistem komunikasi modern.

Prinsip kerja sistem monitoring loker otomatis berbasis Wi-Fi 2,4 GHz dengan antenna mikrostrip *rectangular array* dimulai dari pengiriman sinyal Wi-Fi oleh sumber sinyal, seperti router atau modul ESP32, menuju antenna mikrostrip. Antena ini berfungsi sebagai pemancar dan penerima sinyal, memastikan komunikasi nirkabel antara perangkat monitoring dan sistem loker otomatis berbasis RFID. Sinyal yang diterima oleh antenna kemudian diteruskan melalui jaringan pencatu daya (*feeding network*) dan sistem pencocokan impedansi agar efisiensi transfer energi tetap optimal. Data yang diterima dari RFID pada loker akan diproses oleh perangkat kontrol, seperti mikrokontroler atau Raspberry Pi, yang bertugas mengelola akses dan menyimpan informasi pengguna. Dengan demikian, sistem ini memungkinkan pemantauan real-time dan pengendalian loker secara otomatis melalui koneksi Wi-Fi, sehingga meningkatkan efisiensi dan keamanan penggunaan loker.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Monitoring Loker Otomatis Berbasis WiFi 2,4 GHz

Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke modul RFID aktif berbasis 2,4 GHz. Antena mikrostrip 1×2 dipasang menggunakan konektor SMA dengan impedansi 50Ω . Komunikasi antara RFID *reader* dan *tag* dilakukan melalui antenna *directional* untuk memastikan jangkauan optimal di area target. Data identifikasi dikirim ke server lokal melalui koneksi Wi-Fi menggunakan protokol HTTP POST. Sistem ini memungkinkan kontrol akses otomatis dan *real-time* terhadap unit loker dengan pemrosesan data di sisi *client-server*.

B. Perancangan Antena Mikrostrip *Rectangular Array*

Dalam merancang antenna mikrostrip *rectangular array* dilakukan perhitungan dimensi antenna untuk mendapatkan ukuran antenna sesuai dengan frekuensi kerjanya. Lalu, dilanjutkan melakukan perancangan antenna menggunakan perangkat lunak CST 2021 dan mensimulasikan parameter-parameter antenna seperti *return loss*, VSWR, pola radiasi, *bandwidth*, dan *gain*. Selain itu, dalam merancang antenna mikrostrip, penting untuk menentukan spesifikasi dan penentuan material dari antenna yang akan dirancang karena akan berpengaruh terhadap perhitungan dimensi yang diinginkan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi dan Material Antena Mikrostrip *Rectangular Array*

Spesifikasi	Keterangan	
Antena Mikrostrip <i>Rectangular Array</i>	Frekuensi Kerja	: 2,4 GHZ
	VSWR	: $\leq 2,0$
	Return Loss	: ≤ -10 dB
	Bandwidth	: $\geq 83,5$ MHz
	Impedansi	: 50Ω
PCB FR-4 Epoxy	Konstanta Dielektrik Relative	: 4,4
	Ketebalan Substrat	: 1,6 mm
	Ketebalan Konduktor	: 0,1 mm
	Bahan Konduktor	: Copper (<i>Annealed</i>)
	Impedansi Saluran	: 50Ω

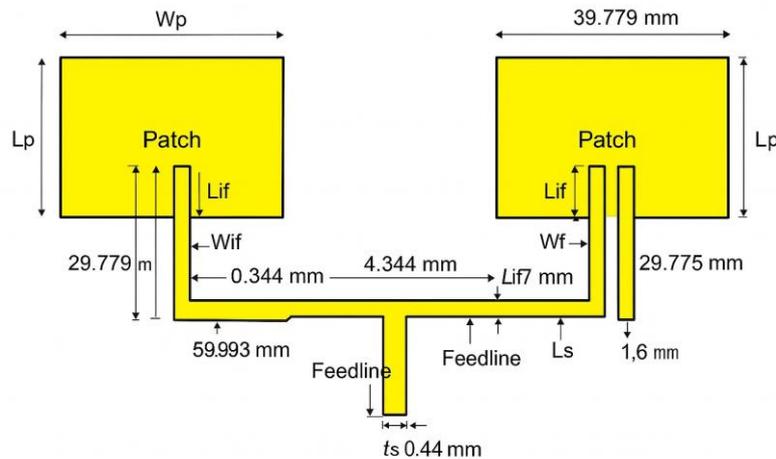
Dalam merancang antenna mikrostrip berbentuk patch persegi panjang, dilakukan perhitungan dimensi antenna menggunakan persamaan (1-6), sehingga menghasilkan parameter antenna mikrostrip *Rectangular Array* seperti Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Dimensi Antena Mikrostrip *Rectangular Array*

Parameter	Nilai (mm)
Lebar Patch (W_p)	38.393 mm
Panjang Patch (L_p)	29.779 mm
Tebal Patch (t_p)	0.035 mm
Jarak Antar Patch (d_p)	15.625 mm
Lebar Ground Plane (W_g)	47.993 mm
Panjang Ground Plane (L_g)	39.379 mm
Tebal Ground Plane (t_g)	0.035 mm
Lebar Substrat (W_s)	47.993 mm
Panjang Substrat (L_s)	39.379 mm
Tebal Substrat (t_s)	1.6 mm
Lebar Feedline (W_f)	4.344 mm
Panjang Feedline (L_f)	15.625 mm
Lebar Inset Feed (W_{if})	1 mm
Panjang Inset Feed (L_{if})	7 mm

C. Simulasi Antena Menggunakan Software *CST Studio Suite*

Dari ukuran tersebut dapat dilakukan langkah selanjutnya yaitu merancang antenna dengan ukuran yang sudah didapatkan menggunakan *software CST Studio Suite*. Setelah dilakukannya perancangan antenna, simulasi dijalankan dan melihat nilai nilai parameter yang diinginkan, jika nilai parameter yang didapatkan tidak sesuai maka dilakukanlah proses optimasi ukuran antenna, setelah itu menjalankan kembali simulasi dan jika hasil yang didapatkan sudah sesuai maka perancangan antenna mikrostrip *rectangular array* untuk komunikasi sistem monitoring loker otomatis berbasis RFID dinyatakan berhasil. Rancangan antenna mikrostrip *rectangular array* dapat dilihat pada Gambar 3. Dimensi dan parameter fisik dari desain antenna mikrostrip *rectangular array* ini dirinci dalam Tabel 2, termasuk ukuran patch, feedline, dan substrat yang disesuaikan dengan frekuensi kerja 2,4 GHz dan pencocokan impedansi 50 Ω .



Gambar 3. Rancangan Antena Mikrostrip *Rectangular Array 1x2 (Tampak Atas)* dengan Konfigurasi *Inset-Fed*

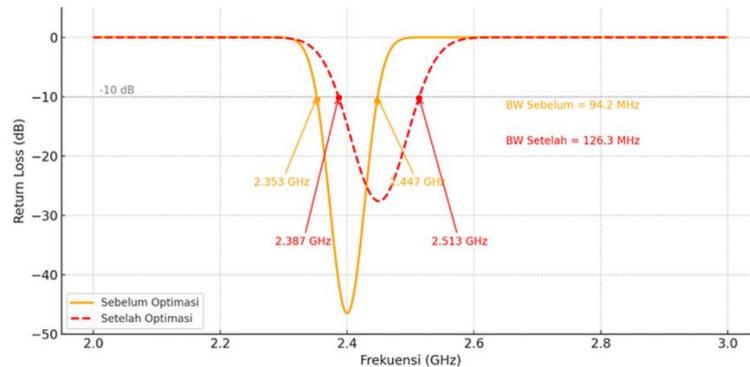
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari perancangan antenna mikrostrip *rectangular array* untuk komunikasi system monitoring loker otomatis berbasis RFID didapatkan hasil yang diperoleh dari proses desain, simulasi, dan pengukuran antenna mikrostrip *rectangular array* yang dirancang untuk beroperasi pada frekuensi 2,4 GHz. Hasil yang ditampilkan mencakup parameter performa utama antenna, seperti *return loss*, *bandwidth*, *impedansi*, *VSWR*, *gain*, dan *pola radiasi*. Hasil yang didapat adalah sebagai berikut :

1. Return Loss

Pada Gambar 4 memperlihatkan grafik *return loss* dari antenna mikrostrip *rectangular array* sebelum dan setelah dilakukan proses optimasi. Grafik ini memberikan gambaran tentang seberapa baik antenna meminimalkan refleksi daya pada frekuensi kerja tertentu. *Return loss* yang lebih rendah menunjukkan

performa pencocokan impedansi yang lebih baik. Grafik *return loss* menunjukkan bahwa performa antenna mengalami peningkatan setelah dilakukan proses optimasi. Sebelum optimasi, antenna mencatat nilai *return loss* minimum sebesar $-46,5$ dB pada frekuensi $2,40$ GHz, dengan bandwidth sebesar $94,2$ MHz yang mencakup rentang frekuensi antara $2,353$ GHz hingga $2,447$ GHz.

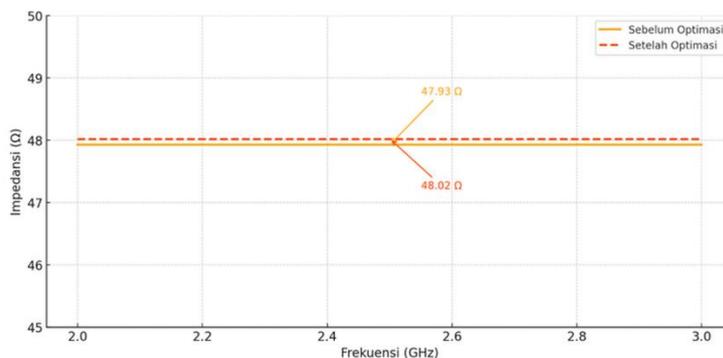


Gambar 4. Hasil Simulasi Return Loss

Setelah optimasi, nilai *return loss* minimum menjadi $-27,6$ dB pada frekuensi $2,45$ GHz, dan *bandwidth* meningkat menjadi $126,3$ MHz, mencakup rentang frekuensi dari $2,387$ GHz hingga $2,513$ GHz. Peningkatan *bandwidth* ini menunjukkan bahwa antenna yang telah dioptimasi memiliki jangkauan kerja yang lebih lebar dan lebih stabil terhadap variasi frekuensi. Meskipun nilai *return loss* sedikit lebih tinggi dari sebelumnya, nilainya masih jauh di bawah batas standar yaitu -10 dB, yang menandakan bahwa energi yang dipantulkan tetap sangat kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa antenna hasil optimasi memenuhi kriteria performa untuk aplikasi RFID pada frekuensi 2.4 GHz.

2. Impedansi

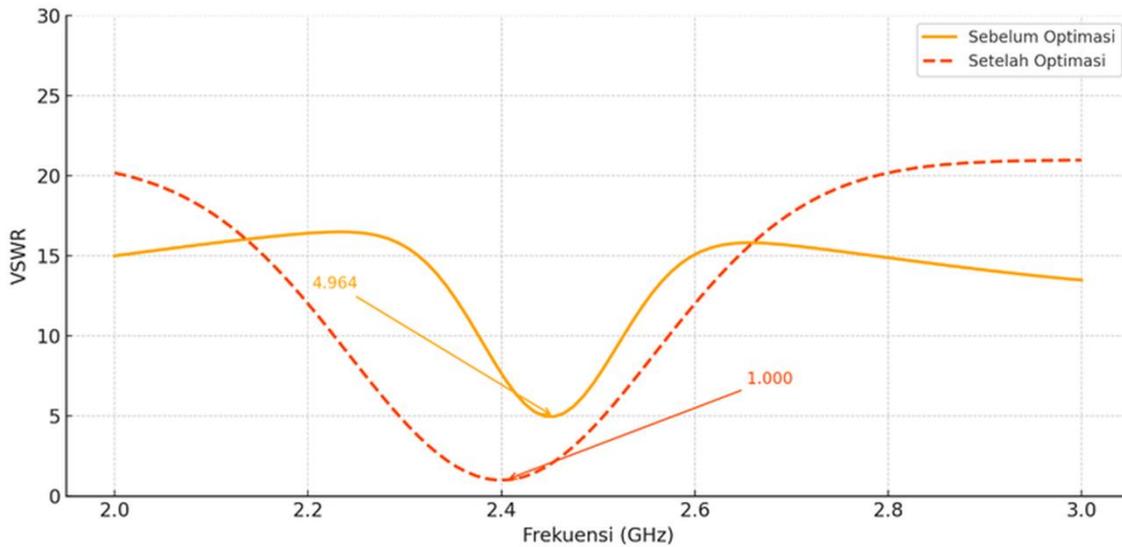
Pada Gambar 5 menunjukkan grafik nilai impedansi antenna mikrostrip rectangular array sebelum dan setelah proses optimasi. Grafik ini menggambarkan sejauh mana nilai impedansi antenna mendekati nilai standar sistem transmisi RF, yaitu 50Ω , yang menjadi acuan utama untuk memastikan efisiensi transfer daya antara sistem pemancar dan antenna. Berdasarkan grafik impedansi di atas, dapat dilihat bahwa baik sebelum maupun setelah dilakukan optimasi, antenna mikrostrip menunjukkan nilai impedansi yang sangat dekat dengan standar sistem transmisi, yaitu 50Ω . Sebelum optimasi, impedansi antenna pada frekuensi resonansi sebesar $2,4$ GHz berada di angka $47,93 \Omega$, sedangkan setelah optimasi, nilai impedansinya sedikit meningkat menjadi $48,02 \Omega$ pada frekuensi $2,45$ GHz. Keduanya menunjukkan bahwa impedansi antenna sudah cukup baik dan berada dalam toleransi sistem transmisi RF, yang menandakan adanya pencocokan beban (*impedance matching*) yang efisien. Impedansi yang mendekati 50Ω ini memastikan bahwa daya yang dikirim dari sistem ke antenna dapat dipancarkan secara optimal tanpa terjadi banyak pantulan kembali, sehingga kinerja antenna menjadi lebih efisien dan stabil. Oleh karena itu, meskipun terdapat sedikit pergeseran nilai impedansi akibat optimasi, performa antenna dalam hal pencocokan beban tetap memenuhi kriteria standar, serta mendukung kelayakan antenna ini untuk digunakan dalam sistem monitoring RFID.



Gambar 5. Hasil Simulasi Impedansi Antena

3. VSWR

Pada Gambar 6 menampilkan grafik hasil simulasi nilai VSWR antenna mikrostrip rectangular array sebelum dan setelah dilakukan proses optimasi. Grafik ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat pencocokan impedansi antara antenna dan sistem transmisi, yang secara langsung memengaruhi efisiensi transfer daya.



Gambar 6. Hasil Simulasi VSWR Antena

Berdasarkan grafik VSWR yang ditampilkan, dapat diamati bahwa performa antenna mengalami peningkatan signifikan setelah dilakukan proses optimasi. Sebelum optimasi, nilai VSWR minimum yang diperoleh mencapai sekitar 4,964 pada frekuensi 2,4 GHz. Nilai ini menunjukkan bahwa masih terdapat ketidaksesuaian antara antenna dan sistem transmisi, karena angka tersebut tergolong tinggi dan melebihi batas ideal dalam sistem RF yang umumnya mengharuskan nilai VSWR tidak lebih dari 2,0. Setelah dilakukan optimasi, terjadi perbaikan yang sangat signifikan. Nilai VSWR turun drastis menjadi 1,000 pada frekuensi 2,45 GHz, yang menandakan pencocokan impedansi antara antenna dan sistem transmisi menjadi hampir sempurna. Dengan kondisi ini, daya yang dikirimkan ke antenna dapat diteruskan secara maksimal dengan pantulan yang sangat minim. Penurunan tajam nilai VSWR ini menjadi bukti bahwa proses optimasi berhasil meningkatkan efisiensi kerja antenna secara keseluruhan.

Tabel 3. Perbandingan Hasil Sebelum dan Setelah Optimasi Antena

Parameter	Hasil Sebelum Optimasi Antena	Hasil Setelah Optimasi Antena
Return Loss	-46,5 dB	-27,6 dB
Impedansi	47,9 Ω	48,0 Ω
VSWR	4,964	1,00

4. Pola Radiasi

Pada Gambar 7 menyajikan pola radiasi antenna mikrostrip *rectangular array* setelah dilakukan proses optimasi pada frekuensi kerja 2,4 GHz. Grafik ini digunakan untuk mengevaluasi arah pancaran utama antenna, distribusi daya radiasi di berbagai sudut, serta karakteristik gain yang dihasilkan. Informasi ini sangat penting untuk menilai kesesuaian antenna dengan kebutuhan sistem RFID yang mengacu pada standar ISO/IEC 18000-4.

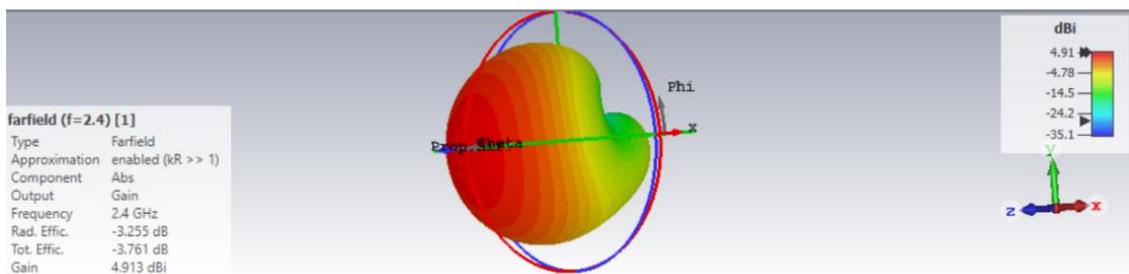


Gambar 7. Hasil Simulasi Pola Radiasi Antena

Berdasarkan grafik pola radiasi setelah optimasi pada frekuensi 2,4 GHz, terlihat bahwa antena memiliki karakteristik pancaran yang bersifat *directional*, dengan main lobe yang mengarah pada sudut 2° dan level sidelobe sebesar -14,2 dB. Nilai gain utama yang tercapai sebesar 4,92 dBi, menunjukkan fokus radiasi yang cukup kuat pada arah tertentu. Sesuai dengan standar ISO/IEC 18000-4, antena yang digunakan dalam sistem RFID pada frekuensi 2,4 GHz dapat bersifat *omnidirectional* maupun *directional*, tergantung pada aplikasinya. Untuk sistem *fixed reader* seperti dalam kasus monitoring loker berbasis RFID, penggunaan antena *directional* justru direkomendasikan karena dapat memusatkan pancaran ke area target secara lebih efisien, meminimalkan interferensi antar reader, dan meningkatkan sensitivitas pembacaan tag. Dengan demikian, pola radiasi yang ditunjukkan grafik ini telah sesuai dengan persyaratan fungsional ISO/IEC 18000-4 untuk aplikasi fixed RFID di band ISM 2,4 GHz.

5. Gain

Pada Gambar 8 menampilkan visualisasi pola radiasi tiga dimensi dari antena mikrostrip array pada frekuensi kerja 2,4 GHz. Grafik ini digunakan untuk menggambarkan sebaran daya pancar antena ke berbagai arah dalam ruang, serta mengidentifikasi arah utama radiasi dan nilai gain maksimum yang dicapai. Evaluasi pola radiasi 3D ini sangat penting untuk memastikan bahwa karakteristik antena sesuai dengan kebutuhan sistem RFID berbasis standar ISO/IEC 18000-4, khususnya untuk aplikasi *fixed reader*.



Gambar 8. Hasil Simulasi Gain Antena

Gambar menunjukkan pola radiasi 3D antena mikrostrip array pada frekuensi 2,4 GHz dengan nilai gain maksimum sebesar 4,913 dBi. Nilai gain ini menunjukkan bahwa antena mampu memfokuskan energi radiasinya ke satu arah utama secara efektif, yang merupakan karakteristik penting dari antena *directional*. Dalam konteks standar ISO/IEC 18000-4, khususnya pada bagian sistem RFID di frekuensi 2,4 GHz, tidak disebutkan batas minimum atau maksimum nilai gain secara eksplisit. Namun, standar tersebut menekankan pentingnya efisiensi komunikasi antara reader dan tag RFID. Gain sebesar hampir 5 dBi termasuk dalam kategori moderat, dan cukup

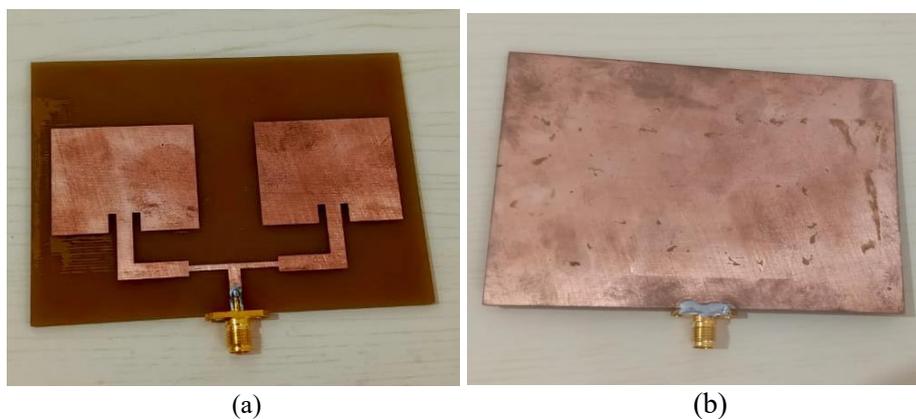
ideal untuk sistem *fixed* RFID reader seperti yang digunakan dalam aplikasi monitoring loker. Nilai ini cukup tinggi untuk menjangkau tag RFID dengan baik dalam area tertentu tanpa menyebabkan interferensi berlebih ke sistem lain di sekitarnya. Gain yang terlalu tinggi justru bisa menyebabkan pancaran terlalu sempit dan tidak cocok untuk sistem *indoor multi-tag*. Dengan demikian, nilai *gain* 4,913 dBi yang dihasilkan sudah selaras dengan kebutuhan aplikasi dan tidak bertentangan dengan ketentuan fungsional dalam ISO/IEC 18000-4.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Simulasi Antena dengan Syarat ISO/IEC 18000-4

Parameter	Syarat ISO/IEC 18000-4 (2.4 GHz RFID)	Hasil Simulasi Antena	Keterangan
Return Loss	≤ -10 dB	-27,6 dB	✔ Jauh lebih baik
VSWR	$\leq 2,0$	1,00	✔ Ideal
Bandwidth	$\geq 83,5$ MHz	126,3 MHz	✔ Melebihi syarat
Impedansi	50 Ω	48,0 Ω	✔ Sangat mendekati
Pola Radiasi	Directional / Omnidirectional (tergantung aplikasi)	Directional	✔ Sesuai untuk fixed reader
Gain	Tidak ditentukan secara eksplisit	4,913 dBi	✔ Ideal untuk sistem RFID indoor

• Hasil Pabrikasi Antena

Pada Gambar 9 menunjukkan hasil pabrikasi dari jenis antena mikrostrip *rectangular array*. Antena ini dicetak di atas substrat FR4 (Flame Retardant 4), yaitu bahan dielektrik yang umum digunakan karena memiliki sifat mekanik yang baik dan biaya yang relatif rendah. Substrat FR4 ini memiliki konstanta dielektrik sekitar $\epsilon_r = 4,4$ dan ketebalan tipikal sekitar 1,6 mm.



Gambar 9. Hasil Pabrikasi Antena (a)Tampak Depan; (b) Tampak Belakang

Bagian *patch* berbentuk persegi tembaga dibentuk dari lapisan tembaga (*copper*) yang dilaminasi pada permukaan FR4. Proses pencetakan patch biasanya dilakukan melalui metode *etching* atau pengupasan lapisan tembaga menggunakan teknik *photolithography*. Untuk konektornya, antena ini menggunakan konektor tipe SMA (*SubMiniature version A*) berjenis female, yang umum digunakan dalam pengukuran RF dan koneksi ke perangkat seperti *Vector Network Analyzer* (VNA). Konektor ini disolderkan pada bagian feedline antena untuk memastikan konektivitas impedansi 50 Ω yang baik antara antena dan sistem transmisi. Kombinasi substrat FR4 dan konektor SMA menjadikan antena ini cocok untuk aplikasi praktis di laboratorium maupun implementasi pada sistem RFID.

• Pengukuran Medan Dekat Antena

Pengukuran dilakukan untuk mengetahui performa antena mikrostrip *patch rectangular* yang beroperasi di frekuensi 2.4 GHz dari parameter *return loss*, *bandwidth*, dan VSWR menggunakan

perangkat keras *Vector Network Analyzer* (VNA). Berikut Tabel 5 perbandingan *return loss*, VSWR dan *bandwidth* berdasarkan spesifikasi minimum standar ISO/IEC 18000-4, simulasi dan pengukuran.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Medan Dekat Antena

Parameter	Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
Return Loss	≤ -10 dB	-27,6 dB	-24,8 dB
VSWR	$\leq 2,0$	1,00	1,16
Bandwidth	$\geq 83,5$ MHz	126,3 MHz	108,7 MHz

Nilai *return loss* dari hasil pengukuran adalah -24,8 dB, yang menunjukkan bahwa hanya sebagian kecil daya yang dipantulkan kembali ke sumber, sedangkan sebagian besar telah berhasil dipancarkan oleh antena. Nilai ini jauh lebih baik dari batas minimum yang disyaratkan dalam spesifikasi, yaitu ≤ -10 dB, sehingga mengindikasikan pencocokan beban yang sangat baik antara antena dan sistem transmisi.

Untuk parameter VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), hasil pengukuran menunjukkan nilai sebesar 1,16. Nilai ini sangat mendekati nilai ideal 1,00 dan masih berada dalam rentang aman karena standar umum untuk sistem RF mensyaratkan nilai $VSWR \leq 2,0$. Semakin mendekati nilai 1,00, semakin sempurna pencocokan impedansi antara antena dan sistem, sehingga daya yang hilang akibat pantulan menjadi sangat minim. Sementara itu, *bandwidth* hasil pengukuran tercatat sebesar 108,7 MHz, yang berarti antena mampu beroperasi secara efektif dalam rentang frekuensi yang cukup lebar. Nilai ini telah melampaui standar minimum bandwidth sebesar 83,5 MHz, dan hanya sedikit di bawah hasil simulasi optimasi tertinggi (126,3 MHz). *Bandwidth* yang lebar ini memungkinkan antena bekerja secara stabil terhadap variasi frekuensi, serta memberikan fleksibilitas dalam penerapan RFID pada berbagai kondisi lingkungan.

• **Pengukuran Pola Radiasi dan Gain**

Hasil pengukuran pola radiasi antena mikrostrip *patch rectangular* yaitu *bidirectional* dengan arah radiasi menuju dua arah. Pengukuran *gain* dilakukan menggunakan metode perbandingan, yaitu membandingkan level sinyal antena *horn* sebagai pemancar dan antena mikrostrip *patch puzzle* sebagai penerima dengan antena mikrostrip *patch puzzle* sebagai pemancar dan antena *horn* sebagai penerima. Antena referensi berupa antena *horn* memiliki *gain* sebesar 11 dBi. Hasil pengujian *gain* didapatkan *power level* antena referensi sebesar -28,78 dBi dan hasil pengujian antena mikrostrip *patch rectangular* sebesar -37,411 dBi, sehingga dapat dihitung besar *gain* menggunakan persamaan (8) sebagai berikut :

$$G_{AUT} = P_{AUT} - P_{REF} + G_{REF} \tag{8}$$

$$G_{AUT} = -37.200 \text{ dBi} - (-28.700) \text{ dBi} + 11 \text{ dBi}$$

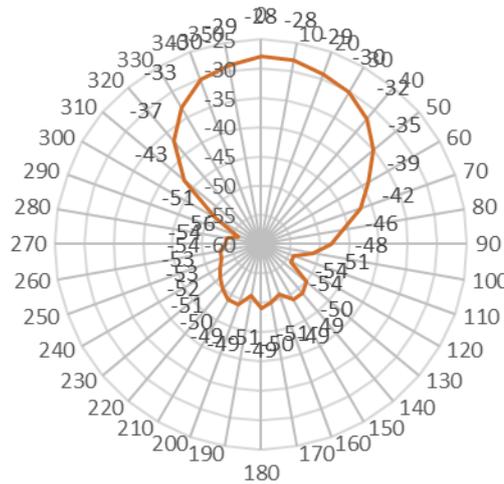
$$G_{AUT} = 2.500 \text{ dBi}$$

Tabel 6. Hasil Pengukuran Gain dan Pola Radiasi

Parameter	Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
Gain	≥ 2 dBi	4,913 dBi	2,500 dBi
Pola Radiasi	Bidirectional	Bidirectional	Bidirectional

Dari sisi *gain*, hasil pengukuran menunjukkan nilai sebesar 2,500 dBi, yang berarti sudah memenuhi syarat minimum spesifikasi yakni ≥ 2 dBi. Walaupun sedikit lebih rendah dibandingkan hasil simulasi yang menunjukkan nilai 4,913 dBi, hasil ini tetap dalam kategori baik. Perbedaan antara simulasi dan pengukuran dapat disebabkan oleh faktor lingkungan nyata yang tidak sepenuhnya ideal, seperti adanya pantulan dan interferensi yang tidak dimodelkan dalam simulasi. Selain itu, rugi-rugi pada konektor, penyolderan, serta ketidaksempurnaan impedansi *feedline* dalam realisasi fisik juga berkontribusi terhadap penurunan nilai *gain* aktual. Hal ini wajar terjadi karena simulasi tidak mempertimbangkan faktor mekanis dan toleransi manufaktur pada antena hasil fabrikasi. Sedangkan, dari sisi pola radiasi yang ditunjukkan pada Gambar

10 bahwa karakteristik pancaran antenna yang bersifat *bidirectional*, dengan dua arah utama pancaran yang dominan pada sudut sekitar 0° dan 180°. Hal ini menandakan bahwa antenna mampu memfokuskan energi radiasinya ke dua arah berlawanan secara efektif. Level sinyal maksimum tercatat mencapai sekitar -28 dB, sementara pancaran pada arah samping atau belakang (*side lobes*) menurun signifikan hingga sekitar -51 dB. Pola ini menggambarkan distribusi radiasi yang terarah dan simetris, sangat ideal untuk aplikasi RFID *fixed reader* seperti sistem monitoring loker, karena dapat meminimalkan interferensi dan memaksimalkan cakupan di area target.



Gambar 10. Hasil Pengukuran Level Sinyal

- **Analisis Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu**

Untuk menilai sejauh mana kinerja antenna yang dirancang dalam penelitian ini dibandingkan dengan studi-studi sebelumnya, dilakukan analisis perbandingan berdasarkan parameter utama antenna, yaitu gain, return loss, VSWR, dan bandwidth. Tabel 7 menyajikan hasil dari beberapa penelitian terdahulu yang relevan, serta disandingkan dengan hasil simulasi dan pengukuran antenna pada penelitian ini.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Simulasi & Pengukuran dengan Penelitian Terdahulu

Studi / Tahun	Jenis Antena	Gain (dBi)	Return Loss (dB)	VSWR	Bandwidth (MHz)
[4]	Array 1×2 & 1×4	3,75–5,82	< -10	1,15–1,21	–
[5]	Array 1×4 & 1×8	9,24	-19	–	129
[6]	Patch tunggal	2,7	-36,7	1,02	104
[7]	Patch tunggal	1,48	-25	~1,00	–
Penelitian saat ini (Simulasi)	Rectangular Array 1×2	4,913	-27,6	1,00	126,3
Penelitian saat ini (Pengukuran)	Rectangular Array 1×2	2,500	-24,8	1,16	108,7

Berdasarkan Tabel 7 di atas, antenna hasil penelitian ini menunjukkan performa yang kompetitif dibandingkan studi terdahulu. Hasil simulasi menunjukkan gain tertinggi sebesar 4,913 dBi dengan return loss sangat baik hingga -46,5 dB dan VSWR mendekati ideal. Hasil pengukuran juga memperlihatkan performa yang memadai, dengan gain sebesar 2,5 dBi, return loss -24,8 dB, VSWR 1,16, dan bandwidth mencapai 108,7 MHz. Semua nilai ini telah memenuhi atau melebihi spesifikasi minimum standar ISO/IEC 18000-4, khususnya dalam hal efisiensi radiasi dan pencocokan impedansi. Ini menunjukkan bahwa antenna yang dirancang layak digunakan untuk aplikasi RFID pada frekuensi 2,4 GHz.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengoptimasi antenna mikrostrip rectangular array yang beroperasi pada frekuensi 2,4 GHz untuk aplikasi sistem monitoring loker berbasis RFID. Optimasi yang dilakukan terbukti mampu meningkatkan performa antenna secara signifikan. Hasil menunjukkan bahwa nilai return loss membaik dari $-46,5$ dB menjadi $-27,6$ dB, VSWR turun menjadi 1,000, dan bandwidth meningkat dari 94,2 MHz menjadi 126,3 MHz. Nilai impedansi antenna juga semakin mendekati nilai ideal 50Ω , serta gain maksimum mencapai 4,91 dBi dengan pola radiasi directional dan side lobe level $-14,2$ dB. Seluruh parameter tersebut telah memenuhi syarat teknis berdasarkan standar ISO/IEC 18000-4 untuk sistem RFID pada frekuensi 2,4 GHz.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta atas dukungan fasilitas dan lingkungan akademik yang kondusif dalam menunjang pelaksanaan riset ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan dorongan dan bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, selama proses penelitian dan penyusunan karya ilmiah ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis bertanggung jawab penuh atas seluruh tahapan penelitian ini, mulai dari identifikasi permasalahan, perancangan dan simulasi antenna, proses optimasi, fabrikasi, hingga pengukuran serta analisis hasil. Penulis juga menyusun seluruh isi naskah, melakukan visualisasi data, serta memastikan kesesuaian hasil penelitian dengan standar teknis yang relevan. Seluruh kegiatan dilakukan secara mandiri dalam rangka memenuhi pelaksanaan Tri Dharma Perguruan Tinggi pada bidang penelitian di Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Smith, “RFID Technology and Its Applications,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 975, p. 8887, 2020.
- [2] A. Kumar and S. Patel, “Design of Compact Microstrip Antenna for RFID Applications,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 20, pp. 1142–1146, 2021.
- [3] L. Zhang and W. Li, “Microstrip Patch Antenna Design for 2.4 GHz RFID Reader,” *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 85, pp. 67–75, 2019.
- [4] Zalki and Bakhar, “Design and Fabrication of Microstrip Antenna Array for IoT,” *Int. J. Electron. Commun.*, vol. 118, pp. 34–40, 2022.
- [5] Youssef, Khan, and Ali, “Simulation of Antenna Array for 2.4 GHz RFID Systems,” *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 37, pp. 112–120, 2023.
- [6] Pachigolla and Reddy, “High Return Loss Patch Antenna for RFID,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 65, pp. 987–993, 2023.
- [7] Verma and Sharma, “Low Gain Antenna Design for Compact RFID Readers,” *Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng.*, vol. 33, p. e23059, 2023.
- [8] Islam, Rahman, and Ahmed, “Design of Meander Line Antenna for IoT Applications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8887–8893, 2019.
- [9] A. Amri and M. Mazri, “Circular Microstrip Antenna Array for IoT-Based RFID Reader Applications,” *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 19, pp. 23–30, 2020.
- [10] P. Chandra and D. Kumar, “Simulated Analysis of Patch Antenna Designs at 2.4 GHz,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 35, p. e5134, 2022.
- [11] S. Rana and H. Kaur, “Review on Various Patch Antenna Designs for RFID Applications,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 162, p. 154291, 2024.
- [12] A. Benkhadda and M. Bensetti, “Design of Reader Antennas for RFID Systems at 2.4 GHz,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 64, pp. 1171–1177, 2022.
- [13] A. Ouazzani and M. Latrach, “Short-Range RFID Reader Antenna Using Inset Feed Patch Design,” *Radioengineering*, vol. 25, pp. 65–71, 2016.
- [14] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.
- [15] J. R. James and P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [16] K. R. Carver and J. W. Mink, “Microstrip antenna technology,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 29, no. 1, pp. 2–24, 1981.
- [17] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, “Microstrip antennas,” *Proc. IEEE*, vol. 80, no. 1, pp. 79–91, 1992.
- [18] J. R. James, P. S. Hall, and C. Wood, “Microstrip patch antennas—Part I: Basic characteristics,” *IEE J. Microw. Opt. Acoust.*, vol. 3, no. 4, pp. 209–217, 19