

Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip Patch Rectangular Array Empat Elemen Pada Frekuensi 920-923 Mhz Untuk Komunikasi Long Range (LoRa)

Khomsah Wafiyatul Amanah¹, Ahmad Hasyim², Sifa Nurpadillah³

^{1,2,3}Fakultas Teknik Universitas Garut, Garut, Jawa Barat, 44151, Indonesia

Korespondensi: 1khomsahwa@gmail.com

ARTICLE HISTORY

Received: 22-12-2024

Revised: 27-06-2025

Accepted: 27-06-2025

Abstrak

LoRa merupakan teknologi komunikasi yang populer dalam aplikasi IoT karena jangkauan hingga 15 km dan konsumsi daya rendah. Teknologi ini telah digunakan di berbagai negara, termasuk Indonesia, karena efisiensi energi dan biaya. Namun, penggunaannya tidak selalu sesuai dengan regulasi frekuensi tiap negara. Sebagian besar perangkat LoRa yang beredar di pasaran bekerja pada frekuensi 433 MHz, 868 MHz, dan 915 MHz. Hal tersebut berbeda dengan regulasi frekuensi LoRa di Indonesia, yang mengharuskan perangkat LPWA (*Low Power Wide Area*) non seluler beroperasi pada rentang frekuensi 920–923 MHz sesuai dengan Peraturan Direktur Jendral Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Informatika No 3 Tahun 2019. Untuk mendukung hal ini, diperlukan pengembangan antena yang sesuai. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mensimulasikan, dan merealisasikan antena mikrostrip *patch rectangular array* yang bekerja pada frekuensi 920-923 Mhz untuk komunikasi LoRa. Antena dirancang menggunakan metode konfigurasi *array* dengan empat elemen peradiasi guna meningkatkan *gain* dan performa antena. Simulasi dilakukan menggunakan CST Studio Suite 2019 untuk memprediksi performa antena. Hasil simulasi menunjukkan VSWR 1.3681, *return loss* -16.169 dB, *gain* 4.015 dBi, dan *bandwidth* 3 Mhz. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa VSWR 3.2521, *return loss* -5.5338 dB, *gain* 6.298 dBi, sedangkan *bandwidth* tidak dapat dihitung karena VSWR lebih dari 2. Pola radiasi di bidang elevasi menunjukkan bahwa hasil simulasi mendekati bentuk *unidirectional*, sedangkan hasil pengukuran menunjukkan bentuk *omnidirectional*. Pada bidang azimuth, simulasi menunjukkan pola *bidirectional*, sementara pengukuran memperlihatkan pola *omnidirectional*. Meskipun antena berhasil meningkatkan gain secara signifikan, terdapat perbedaan parameter antara hasil perhitungan, simulasi, dan pengukuran.

Kata kunci: LPWA, LoRa, Mikrostrip, Array, CST Studio Suite.

Design and Realization of a Four-Element Rectangular Microstrip Patch Array Antenna at 920-923 Mhz for Long Range (LoRa) Communication

Abstract

LoRa is a popular communication technology in IoT applications due to its long range—up to 15 km—and low power consumption. This technology has been adopted in various countries, including Indonesia, because of its energy and cost efficiency. However, its use

does not always comply with the frequency regulations in each country. Most LoRa devices available on the market operate at frequencies of 433 MHz, 868 MHz, and 915 MHz. This differs from Indonesia's frequency regulations for LoRa, which require non-cellular LPWA (Low Power Wide Area) devices to operate within the 920–923 MHz frequency range, in accordance with Regulation No. 3 of 2019 issued by the Director General of Resources and Postal and Informatics Devices. To support this requirement, antenna development that aligns with the regulation is necessary. This research aims to design, simulate, and realize a rectangular microstrip patch array antenna that operates in the 920–923 MHz frequency band for LoRa communication. The antenna is designed using an array configuration with four radiating elements to enhance gain and overall performance. Simulations were carried out using CST Studio Suite 2019 to predict the antenna's performance. The simulation results show a VSWR of 1.3681, return loss of -16.169 dB, gain of 4.015 dBi, and a bandwidth of 3 MHz. The measurement results indicate a VSWR of 3.2521, return loss of -5.5338 dB, and gain of 6.298 dBi, while the bandwidth could not be determined due to the VSWR exceeding 2. The radiation pattern in the elevation plane shows that the simulation results closely resemble a unidirectional pattern, while the measurements exhibit an omnidirectional pattern. In the azimuth plane, the simulation shows a bidirectional pattern, whereas the measurement reveals an omnidirectional one. Although the antenna successfully enhances gain significantly, discrepancies exist between the calculated, simulated, and measured parameters.

Key words: LPWA, LoRa, Microstrip, Array, CST Studio Suite.

1. Pendahuluan

LoRa adalah teknologi komunikasi terbaru dalam *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) yang merupakan sistem komunikasi nirkabel untuk *internet of things* (IoT). Teknologi ini menawarkan jangkauan hingga 15 km dengan konsumsi daya rendah [1], menjadikannya solusi menarik untuk berbagai aplikasi IoT. Saat ini, LoRa digunakan di berbagai negara di dunia termasuk Indonesia karena hemat energi dan biaya [2]. Namun, penggunaan LoRa tidak selalu sesuai dengan regulasi frekuensi di masing-masing negara. Sebagian besar perangkat LoRa yang beredar di pasaran bekerja pada frekuensi 433 MHz, 868 MHz, dan 915 MHz. Hal tersebut berbeda dengan regulasi frekuensi LoRa di Indonesia, yang mengharuskan perangkat LPWA (Low Power Wide Area) non seluler beroperasi pada rentang frekuensi 920–923 MHz sesuai dengan Peraturan Direktur Jendral Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Perangkat Informatika No 3 Tahun 2019 [3]. Maka dari itu, diperlukan instrumen yang mendukung frekuensi kerja LoRa di Indonesia.

Instrumen yang mendukung frekuensi kerja LoRa di Indonesia masih terbatas. Salah satu contoh adalah Antares Connectivity–LoRaWAN, yang merupakan satu-satunya produk yang tersertifikasi oleh Kementerian Komunikasi dan Informatika (Kominfo) dan mengoperasikan jaringan di frekuensi 920–923 MHz [4]. Di samping itu, ada juga produk lokal seperti Tuni Modul LoRa yang diproduksi di Indonesia dan dapat diintegrasikan dengan berbagai mikrokontroler. Produk ini sesuai dengan regulasi di Indonesia dan mendukung frekuensi 920–923 MHz [5]. Dalam rangka mendukung implementasi teknologi LoRa yang sesuai dengan regulasi frekuensi di Indonesia, diperlukan

pengembangan produk baru. Salah satu komponen penting dalam pengimplementasian teknologi komunikasi LoRa adalah antena, yang berfungsi sebagai alat pemancar dan penerima sinyal nirkabel. Antena mikrostrip menjadi pilihan yang menarik karena desainnya yang sederhana, tipis, dan relatif mudah dipabrikasi. Namun memiliki beberapa kekurangan berupa *bandwidth* dan *gain* yang dihasilkan yang terbatas [6] [7].

Beberapa penelitian telah dilakukan sebelumnya terkait perancangan antena mikrostrip untuk komunikasi LoRa. Pada penelitian [7], telah dilakukan perancangan antena mikrostrip *bowtie* untuk komunikasi LoRa dengan hasil penelitian berupa *return loss* – 62.5 dB, VSWR 1.001, dan *gain* 3.371 dBi. Sedangkan pada penelitian [8], telah dilakukan perancangan antena mikrostrip untuk komunikasi LoRa dengan hasil penelitian *return loss* –13.99 dB, VSWR 1.59, dan *gain* 1.1929 dBi. Namun, terdapat kekurangan dalam penelitian-penelitian tersebut, yaitu terkait dengan tingkat *gain* antena yang masih relatif kecil [8]. Nilai *gain* pada antena merupakan indikator penting untuk menguatkan sinyal. Untuk mengatasi keterbatasan ini, solusi yang dapat diimplementasikan adalah dengan menggunakan konfigurasi *array*, yaitu menggabungkan banyak elemen peradiasi dalam satu antena [6]. Penggunaan teknik *array* diharapkan dapat menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam tingkat *gain* antena yang direncanakan, sehingga mampu secara lebih efektif memperkuat sinyal dan secara keseluruhan meningkatkan kualitas komunikasi yang diimplementasikan dalam aplikasi LoRa.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan simulasi untuk mendesain, menguji, dan menganalisis kinerja antena mikrostrip patch rectangular array. Prosesnya meliputi desain dengan perangkat lunak, pembuatan antena, serta pengukuran di laboratorium guna membandingkan hasil simulasi dan pengukuran.

2.1 Alat

Penelitian ini menggunakan beberapa alat utama untuk mendesain, mensimulasikan, dan mengukur performa antena, baik saat perancangan maupun pengujian di laboratorium guna memperoleh data parameter antena secara akurat.

- a. Laptop Infinix Inbook X1 dengan RAM 8 GB, penyimpanan 256 GB, dan *chipset* Intel core i3 yang digunakan pada saat melakukan perancangan dan simulasi.
- b. CST Studio Suite 2019, sebuah *software antena simulator* yang digunakan untuk mensimulasikan antena yang sudah dirancang.
- c. VNA atau *Vector Network Analyzer* yang digunakan pada saat pengukuran parameter antena.
- d. Antena horn, antena referensi pada pengukuran parameter *gain* dan pola radiasi.
- e. Antena mikrostrip *patch rectangular array* empat elemen sebagai antena yang diukur.

2.2 Bahan

Selain alat, penelitian ini juga memerlukan beberapa bahan fisik yang penting untuk pembuatan dan pengukuran antena. Bahan-bahan tersebut berperan dalam proses perancangan dan turut memengaruhi hasil pengukuran.

- a. FR4 Epoxy digunakan sebagai *substrate* yang berfungsi sebagai media penyalur gelombang electromagnet dari system pencatuan.
- b. Copper digunakan sebagai *patch* yang berfungsi sebagai peradiasi, dan juga sebagai *groundplane* yang berfungsi sebagai pemantul sinyal yang tidak diinginkan.

2.3 Prosedur

Prosedur penelitian ini mencakup analisis perancangan, pembuatan flowchart, penentuan spesifikasi antena, simulasi menggunakan CST Studio Suite, fabrikasi antena, pengukuran parameter, serta analisis hasil perbandingan.

a. Analisa perancangan

Proses perancangan antena dimulai dengan identifikasi spesifikasi yang dibutuhkan, kemudian dilanjutkan dengan perancangan untuk memenuhinya. Antena yang digunakan adalah mikrostrip *patch rectangular array* empat elemen yang beroperasi pada frekuensi 920–923 MHz.

Langkah selanjutnya adalah simulasi menggunakan CST Studio Suite 2019 untuk memperoleh parameter antena seperti VSWR, *return loss*, *bandwidth*, *gain*, dan pola radiasi. Jika hasil simulasi sesuai spesifikasi, desain dianalisis dan dilanjutkan ke tahap pabrikasi, yakni pembuatan antena fisik. Setelah itu, parameter antena diukur untuk memastikan kesesuaiannya dengan hasil simulasi. Jika ada perbedaan, dilakukan analisis lanjutan untuk mengetahui nilai perbandingan dan penyebabnya.

b. Persamaan yang digunakan

1. Panjang *patch*

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

dimana:

- c : Kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)
- f_0 : Frekuensi kerja (Hz)
- ϵ_r : Konstanta dielektrik substrat

2. Menghitung lebar *ground plane* (W_g)

$$W_g = (6 \times h) + W \dots\dots\dots (2)$$

3. Menghitung panjang *ground plane* (L_g)

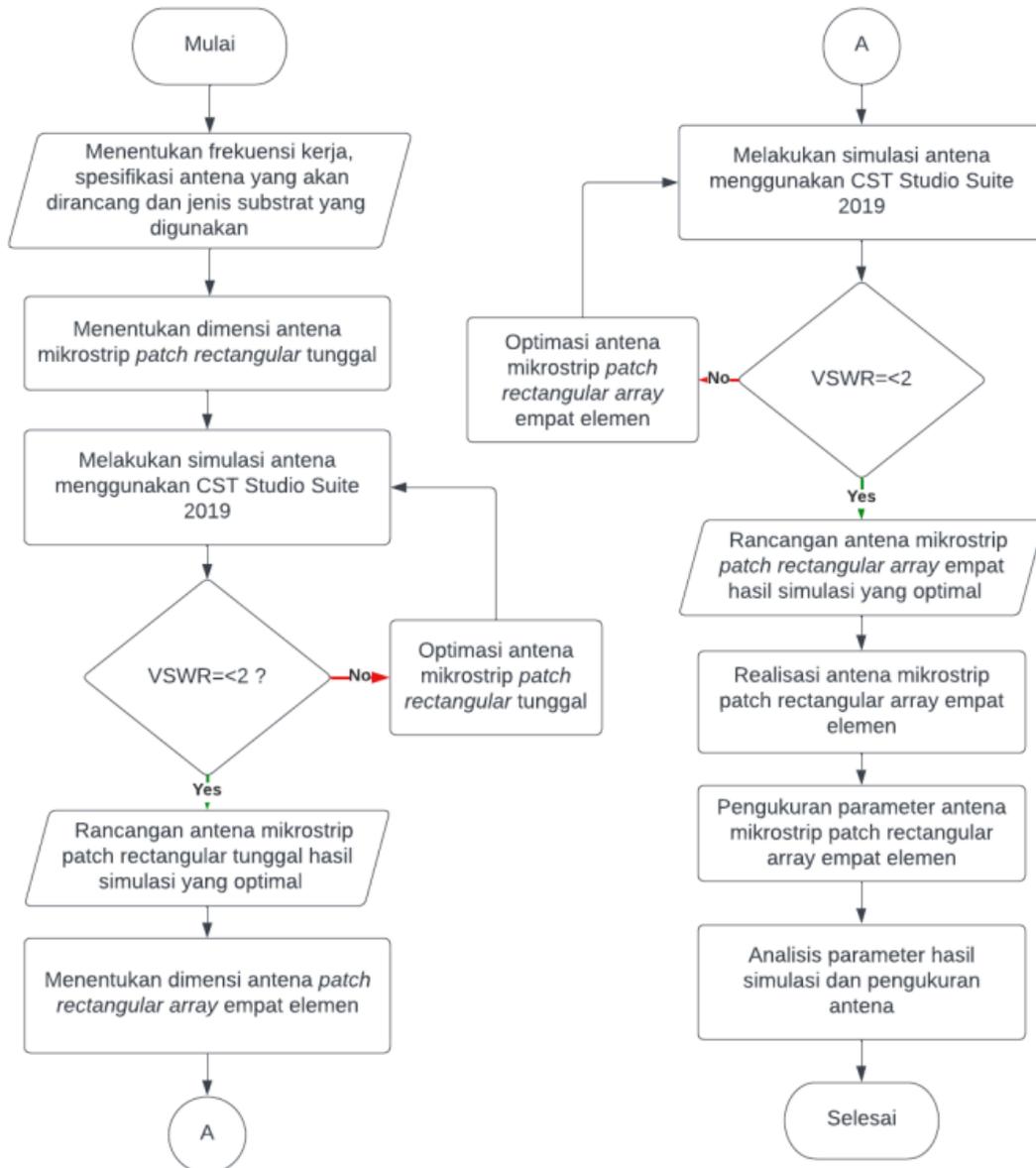
$$L_g = (6 \times h) + L \dots\dots\dots (3)$$

c. Spesifikasi antena mikrostrip *patch rectangular array* ditunjukkan pada tabel 1.

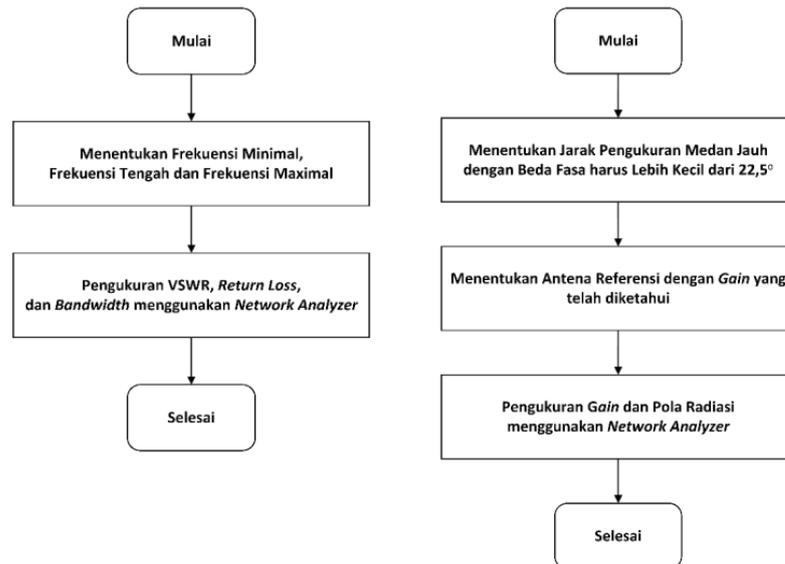
Tabel 1. Spesifikasi Antena yang dirancang

Parameter	Nilai
Frekuensi	920-923 Mhz
VSWR	≤ 2
Return loss	≤ -10 dB
Gain	> 3 dBi
Bandwidth	3 Mhz
Pola Radiasi	<i>Unidirectional</i>

d. Flowchart perancangan dan pengukuran antenna

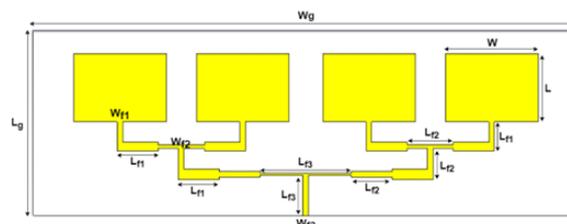
**Gambar 1.** Tahapan perancangan antenna.

Gambar 1 menunjukkan metodologi perancangan antenna mikrostrip *patch rectangular array* empat elemen, dimulai dari penentuan spesifikasi dan dimensi awal, dilanjutkan simulasi serta optimasi iteratif dengan CST Studio Suite hingga diperoleh VSWR optimal. Setelah desain terverifikasi, antenna direalisasikan secara fisik, kemudian dilakukan pengukuran parameter dan analisis perbandingan hasil simulasi dan pengukuran.



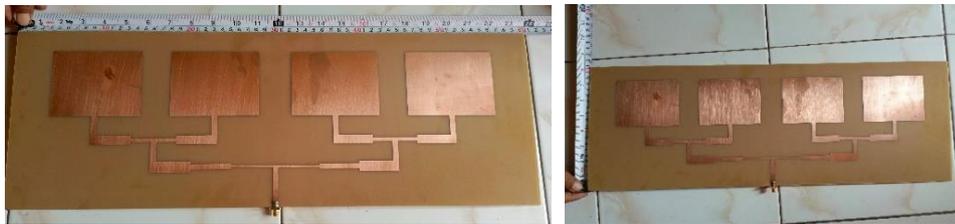
Gambar 2. Tahapan pengukuran antenna.

- e. Simulasi antenna berdasarkan spesifikasi yang telah ditentukan diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain antenna hasil simulasi.

- f. Pabrikasi antenna berdasarkan spesifikasi yang telah ditentukan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Antena hasil pabrikasi

3. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini, hasil-hasil yang telah diperoleh dari simulasi dan pengukuran antenna mikrostrip *patch rectangular array* akan dianalisis dan dibandingkan.

3.1 Hasil Pengukuran VSWR

Berdasarkan hasil pengukuran, pada frekuensi 920 MHz nilai VSWR tercatat sebesar 3.1316; pada 921.5 MHz mencapai 3.2521, dan pada 923 MHz nilai VSWR menurun menjadi 3.3634. Tingginya nilai VSWR yang terukur menunjukkan ketidakcocokan impedansi, yang kemungkinan besar diakibatkan oleh deviasi manufaktur dimensi antenna, variasi permitivitas substrat.



Gambar 5. Hasil Pengukuran VSWR

3.2 Hasil Pengukuran Return Loss

Berdasarkan hasil pengukuran Gambar 6, return loss pada frekuensi 920 Mhz berada pada -5.7601 dB, pada frekuensi 921.5 Mhz didapat return loss sebesar -5.5338 dB, sedangkan pada frekuensi 923 Mhz return loss mencapai -5.3395 dB. Nilai return loss yang kurang dari -10 dB menunjukkan bahwa lebih dari 28% dari daya yang diberikan ke antenna dipantulkan kembali dan tidak diradiasikan. Hal ini akan secara signifikan mengurangi efisiensi radiasi antenna.



Gambar 6. Hasil Pengukuran Return Loss

3.3 Hasil Pengukuran Bandwidth

Karena hasil pengukuran VSWR lebih dari 2, maka *bandwidth* tidak dapat diukur. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan impedansi antara antenna dan saluran transmisi yang menunjukkan bahwa antenna tidak bekerja dengan baik pada rentang frekuensi yang diinginkan. Bandwidth antenna tidak dapat diukur karena nilai VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) yang konsisten di atas 2,0. Kondisi ini mengindikasikan adanya ketidakcocokan impedansi signifikan antara antenna dan saluran transmisi, yang menyebabkan sebagian besar daya dipantulkan kembali dan antenna tidak beroperasi secara efisien pada frekuensi yang diinginkan [9]. Secara matematis, VSWR yang tinggi berbanding lurus dengan Return Loss yang buruk (kurang negatif), menunjukkan pantulan daya yang besar, sehingga bandwidth yang valid tidak dapat ditentukan [10]

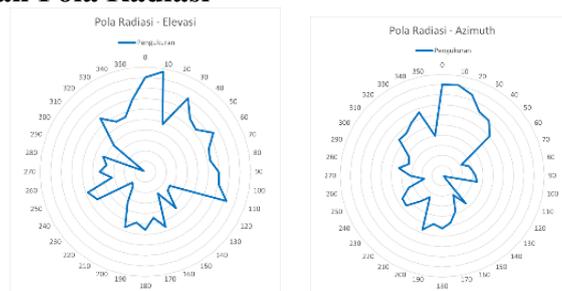
3.4 Hasil Pengukuran Gain

$$GT = G_s + 10 \log Pt/P_s \dots\dots\dots (4)$$

$$GT = 4.305 + 10 \log 10^{-4.16661/10} / 10^{-6.16/10}$$

$$GT = 6.298 \text{ dBi}$$

3.5 Hasil Pengukuran Pola Radiasi



Gambar 7. Hasil Pengukuran Pola Radiasi

3.6 Perbandingan VSWR

Tabel 2. Perbandingan VSWR

Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
≤ 2	1.3681	3.2521

Nilai VSWR yang diharapkan adalah ≤ 2 untuk memastikan performa antena dengan pantulan daya minimal. Hasil simulasi pada Tabel 2 menunjukkan nilai 1,3681, menandakan *matching* yang baik. Namun, hasil pengukuran menunjukkan nilai 3,2521, jauh di atas spesifikasi, mengindikasikan *mismatch* signifikan. Perbedaan ini disebabkan oleh faktor *non-ideal* dalam realisasi fisik dan pengukuran, seperti toleransi manufaktur, variasi substrat, kualitas koneksi feeding, kondisi lingkungan, serta ketidakakuratan kalibrasi alat ukur.

3.7 Perbandingan Return Loss

Tabel 3. Perbandingan Return Loss

Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
≤ -10 dB	-16.169 dB	-5.5338 dB

Nilai *return loss* yang diinginkan adalah ≤ -10 dB, yang mana antena diharapkan mampu menekan daya pantulan kembali ke sumber dengan baik. Berdasarkan simulasi Tabel 3. didapat sekitar -16.169 dB, sedangkan berdasarkan pengukuran didapat nilai return loss sebesar -5.5338 dB yang menunjukkan bahwa daya pantul antena cukup besar, sehingga performa antena tidak optimal.

3.8 Perbandingan Bandwidth

Tabel 4. Perbandingan Bandwidth

Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
3 Mhz	2.85 Mhz	-

Bandwidth yang ditargetkan adalah 3 MHz, namun hasil simulasi pada Tabel 4 menunjukkan nilai 2,85 MHz, sedikit di bawah spesifikasi. Sementara itu, pengukuran tidak menghasilkan bandwidth karena nilai VSWR melebihi 2, menandakan adanya *mismatch* signifikan antara antena dan sistem transmisi yang menghambat kinerja antena.

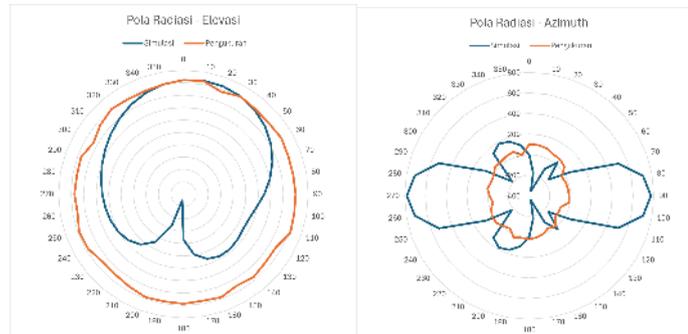
3.9 Perbandingan Gain

Tabel 5. Perbandingan Gain

Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
> 3 dBi	4.015 dBi	6.298 dBi

Gain antenna yang diinginkan adalah > 3 dBi untuk memenuhi kebutuhan aplikasi dan memastikan efisiensi pemancaran sinyal. Berdasarkan simulasi Tabel 5, gain yang didapat sebesar 4.015 dBi, memenuhi spesifikasi. Sedangkan berdasarkan pengukuran, didapat nilai gain sebesar 6.298 dBi.

3.10 Perbandingan Pola Radiasi



Gambar 8. Perbandingan Pola Radiasi

Gambar 8 Pola radiasi pada bidang elevasi dari hasil simulasi menunjukkan pola *unidirectional* karena *main lobe* menonjol pada satu arah pancaran sedangkan hasil pengukuran terlihat menunjukkan karakteristik *omnidirectional*, terutama dalam bentuk yang seragam ke segala arah dalam bidang elevasi. Pola radiasi pada bidang azimuth dari simulasi menunjukkan pola *bidirectional* dengan beberapa penekanan pada arah–arah tertentu. Sedangkan hasil pengukuran terlihat mendekati karakteristik *omnidirectional*, terutama dalam bentuk yang seragam ke segala arah dalam bidang azimuth.

4. Kesimpulan

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil perhitungan, simulasi, dan pengukuran terhadap antenna mikrostrip *patch rectangular array* yang telah direalisasikan pada frekuensi 920–923 MHz, dapat disimpulkan bahwa antenna telah berhasil dirancang dan disimulasikan menggunakan CST Studio Suite sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan, meskipun hasil realisasi menunjukkan perbedaan pada beberapa parameter dibandingkan dengan hasil simulasi. Antena ini direalisasikan dengan dimensi panjang *patch* (W) 101,60 mm, lebar *patch* (L) 76 mm, lebar *ground plane* (Wg) 600 mm, panjang *ground plane* (Lg) 205 mm, serta saluran pencatu dengan impedansi 50 Ω , 70,71 Ω , dan 100 Ω masing-masing memiliki ukuran lebar dan panjang yang berbeda. Hasil pengukuran menunjukkan nilai VSWR sebesar 3,2521 yang berbeda cukup signifikan dari hasil simulasi sebesar 1,3681 dan perhitungan sebesar 1,998; return loss hasil pengukuran -5,5338 dB juga menunjukkan perbedaan dibanding hasil simulasi -16,169 dB dan perhitungan -9,551 dB; impedansi hasil pengukuran 30,672 Ω lebih rendah dibandingkan hasil simulasi 50 Ω dan perhitungan 73,697 Ω ; gain hasil pengukuran sebesar 6,298 dBi justru lebih tinggi dari hasil simulasi 4,015 dBi dan perhitungan 5,371 dBi; bandwidth hasil simulasi 2,85 MHz sedikit lebih kecil dari perhitungan 3 MHz, sedangkan bandwidth hasil pengukuran tidak dapat dihitung karena nilai VSWR ≥ 2 . Dari segi pola radiasi, simulasi menunjukkan pola *unidirectional* pada bidang elevasi dan *bidirectional* pada bidang azimuth, sedangkan hasil pengukuran menunjukkan pola *omnidirectional*

pada kedua bidang tersebut. Implikasi dari tingginya nilai VSWR dan buruknya *return loss* pada hasil pengukuran menunjukkan adanya ketidakcocokan impedansi yang signifikan, sehingga efisiensi radiasi antena menjadi rendah dan dapat membatasi jangkauan komunikasi LoRa serta meningkatkan konsumsi daya perangkat yang terhubung. Oleh karena itu, antena yang telah direalisasikan saat ini belum sepenuhnya optimal untuk implementasi komunikasi LoRa jarak jauh, dan diperlukan optimasi lebih lanjut baik dari sisi proses fabrikasi maupun desain agar dapat memenuhi standar performa aplikasi LoRa.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu dan keluarga tercinta atas do'a dan dorongan motivasinya. Serta kepada berbagai pihak yang telah memberikan saran dan arahan dalam proses penyelesaian penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] I. Nuur and R. Hantriono1, "Antena Mikrostrip Keping Rektangular Dengan Celah Bentuk-U Untuk Lora 923 Mhz Pada Cubesat 1u Mimo U-Shape Slotted Rectangular Patch Microstrip Antenna For Lora 923 Mhz On Cubesat 1u." in proc of engineering. pp. 4833. Vol 8. Okt, 5, 2021.
- [2] BRIN Arf, "Kembangkan Teknologi LoRa IoT, Periset BRIN Gunakan Software HTZ Communications." Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.brin.go.id/news/114698/kembangkan-teknologilora-iot-periset-brin-gunakan-software-htz-communications>.
- [3] Kemenkominfo, "Peraturan Direktur Jenderal Dan Perangkat Pos Dan Informatika No. 3 Tahun 2019 Tentang Persyaratan Teknis Alat Dan/ Atau Peragkat Telekomunikasi Low Power Wide Area," 2019.
- [4] Leap, "Pemanfaatan IoT dan LoRaWan," Leap by Telkom. Accessed: Sep. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.leap.digitalbisa.id/article/pemanfaatan-iot-dan-lorawan>.
- [5] KMTek, "Build Your Own Connectivity using Tuni Module." Accessed: Sep. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.kmtech.id/connectivitymodule>.
- [6] S. Alam and I. Wijaya, "Perancangan Antena Mikrostrip Array 2 x 2 Frekuensi 2.4 GHz untuk Komunikasi IoT," E - ISSN, jurnal kajian teknik elektro, vol. 3, no. Maret-Agustus, pp. 1–10, 2018.
- [7] R. R. Rachmatullah, MT. Sotyohadi, ST., and M. Michael Ardita, ST., "Rancang Bangun Antena Mikrostrip Patch Bowtie Dengan Pencatuan Proximity Coupled Untuk Aplikasi Lora Pada Frekuensi 920-923 Mhz," 2022. Seminar nasional. Juli, 13, 2022.
- [8] A. C. Perdana, B. S. Nugroho, and Edwar, "Perancangan Antena Mikrostrip Untuk Lora Pada Frekuensi 922 Mhz," e-Proceeding of Engineering, vol. 8, no. 6, pp. 3416–3423, 2022.
- [9] Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [10] Kraus, J. D., & Forsyth, K. R. (2002). *Antennas for All Applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.