

Perancangan Antena MIMO Metamaterial Sub-6 GHz untuk Komunikasi Darurat Pascabencana Berbasis UAV

Tengku Machdalie Sofie¹, Gunawan Sihombing^{2*}

^{1,2}Universitas Amir Hamzah, Kota Medan, Sumatera Utara 20221, Indonesia

Korespondensi: gunawansihombing6939@gmail.com

ARTICLE HISTORY

Received: 22-05-2026

Revised: 22-06-2026

Accepted: 22-06-2026

Abstrak

Kerusakan infrastruktur telekomunikasi akibat bencana menyebabkan terputusnya komunikasi sehingga dibutuhkan sistem komunikasi darurat yang cepat, fleksibel, dan andal. *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dapat dimanfaatkan sebagai *aerial base station*, namun implementasi antena MIMO pada UAV menghadapi kendala *mutual coupling* akibat keterbatasan ruang pemasangan. Penelitian ini mengusulkan antena mikrostrip MIMO Sub-6 GHz berbasis metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) untuk meningkatkan gain, bandwidth, dan *isolation* sekaligus menurunkan *mutual coupling*. Penelitian dilakukan melalui tahapan perancangan, simulasi, optimasi, fabrikasi, dan pengujian menggunakan CST Studio Suite dan ANSYS HFSS. Antena dirancang pada frekuensi 3,5–5,8 GHz menggunakan substrat Rogers RT5880 dengan konfigurasi MIMO 2×2. Parameter yang dianalisis meliputi *return loss*, VSWR, gain, bandwidth, *mutual coupling*, *isolation*, *Envelope Correlation Coefficient* (ECC), dan efisiensi radiasi. Hasil penelitian menunjukkan nilai *return loss* sebesar -31,2 dB, VSWR 1,08, gain 9,8 dBi, bandwidth 1,15 GHz, dan efisiensi radiasi 87,4%. Penerapan struktur CSRR menurunkan *mutual coupling* dari -12 dB menjadi -24 dB serta meningkatkan *isolation* hingga 24,1 dB, sedangkan nilai ECC sebesar 0,011 menunjukkan performa *diversity* MIMO yang sangat baik. Hasil pengujian juga menunjukkan antena mampu mempertahankan komunikasi yang stabil dengan latensi rendah pada platform UAV. Dengan demikian, antena MIMO berbasis metamaterial CSRR berpotensi mendukung sistem komunikasi darurat pascabencana melalui peningkatan kualitas komunikasi, perluasan jangkauan sinyal, dan komunikasi *real-time* yang lebih andal.

Kata kunci: Antena MIMO, CSRR, Komunikasi Darurat, Metamaterial, Sub-6 GHz, UAV.

Design of Sub-6 GHz Metamaterial MIMO Antenna for UAV-Based Post-Disaster Emergency Communication

Abstract

Damage to telecommunication infrastructure caused by natural disasters often disrupts communication, highlighting the need for a fast, flexible, and reliable emergency communication system. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) can serve as aerial base stations; however, the implementation of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) antennas on UAVs is challenged by mutual coupling due to limited installation space.

Journal Homepage: <https://journal.uniga.ac.id/index.php/JFT/index>

This study proposes a Sub-6 GHz microstrip MIMO antenna integrated with a Complementary Split Ring Resonator (CSRR) metamaterial structure to improve gain, bandwidth, and isolation while reducing mutual coupling. The antenna was designed, simulated, optimized, fabricated, and tested using CST Studio Suite and ANSYS HFSS. It operates at 3.5–5.8 GHz using a Rogers RT5880 substrate in a 2×2 MIMO configuration. Performance evaluation was conducted based on return loss, voltage standing wave ratio (VSWR), gain, bandwidth, mutual coupling, isolation, envelope correlation coefficient (ECC), and radiation efficiency. The proposed antenna achieved a return loss of –31.2 dB, VSWR of 1.08, gain of 9.8 dBi, bandwidth of 1.15 GHz, and radiation efficiency of 87.4%. The incorporation of the CSRR structure reduced mutual coupling from –12 dB to –24 dB and improved isolation to 24.1 dB, while the low ECC value of 0.011 indicates excellent MIMO diversity performance. Experimental validation on a UAV platform also demonstrated stable communication, low latency, and reliable data transmission under dynamic operating conditions. These results indicate that the proposed CSRR-based MIMO antenna is a promising solution for post-disaster emergency communication systems by enhancing communication quality, extending signal coverage, and supporting reliable real-time communication.

Key words: *Complementary Split Ring Resonator (CSRR), Emergency Communication, Metamaterial, MIMO Antenna, Sub-6 GHz, Unmanned Aerial Vehicle (UAV).*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara yang memiliki tingkat kerawanan bencana alam yang tinggi, seperti gempa bumi, tsunami, banjir, dan tanah longsor. Pada kondisi pascabencana, infrastruktur telekomunikasi sering mengalami kerusakan sehingga komunikasi antara tim penyelamat, pusat koordinasi, dan masyarakat terdampak menjadi terganggu. Kondisi tersebut menyebabkan keterlambatan distribusi informasi, proses evakuasi korban, serta penyaluran bantuan logistik. Oleh karena itu, perkembangan teknologi komunikasi nirkabel menjadi kebutuhan penting dalam sistem tanggap darurat bencana, terutama di Indonesia yang rawan gempa bumi, tsunami, banjir, dan longsor [1], [2]. Kerusakan infrastruktur telekomunikasi saat bencana sering menyebabkan terputusnya komunikasi sehingga menghambat koordinasi penyelamatan dan distribusi bantuan [3]–[5].

Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah pemanfaatan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau drone sebagai media komunikasi darurat karena memiliki mobilitas tinggi, fleksibel, dan mampu menjangkau wilayah yang sulit diakses [6], [7]. Dalam sistem komunikasi pascabencana, UAV dapat berfungsi sebagai *temporary base station*, *relay* komunikasi, maupun platform pemantauan sehingga komunikasi tetap berlangsung meskipun infrastruktur telekomunikasi darat mengalami kerusakan. Namun, keterbatasan ruang pemasangan dan sumber daya pada UAV menuntut penggunaan antena yang kompak, ringan, memiliki gain tinggi, bandwidth lebar, serta mampu mempertahankan kualitas komunikasi pada kondisi lingkungan yang dinamis [8], [9]. Teknologi *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) banyak digunakan untuk meningkatkan kapasitas dan keandalan komunikasi, namun implementasinya pada UAV masih menghadapi kendala berupa *mutual coupling* antar elemen antena akibat jarak pemasangan yang berdekatan. Kondisi tersebut dapat menurunkan gain, efisiensi radiasi, meningkatkan korelasi sinyal, serta mengurangi performa sistem komunikasi secara keseluruhan [10]–[13]. Berbagai

metode telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut, di antaranya *Defected Ground Structure* (DGS), *Electromagnetic Band Gap* (EBG), *neutralization line*, dan metamaterial. Meskipun mampu meningkatkan isolasi antar elemen antenna, sebagian besar metode tersebut masih memiliki keterbatasan, seperti perubahan pola radiasi, dimensi antenna yang relatif besar, bekerja pada pita frekuensi tunggal, atau belum mempertimbangkan keterbatasan ukuran dan bobot yang dibutuhkan pada platform UAV. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penggunaan metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR), yaitu struktur resonator yang mampu memanipulasi karakteristik elektromagnetik antenna dengan menghambat propagasi *surface wave* antar elemen antenna. Penerapan CSRR berpotensi mengurangi *mutual coupling*, meningkatkan *isolation*, memperlebar bandwidth, serta meningkatkan gain tanpa menambah dimensi antenna secara signifikan. Karakteristik tersebut menjadikan CSRR sesuai untuk antenna MIMO mikrostrip pada rentang frekuensi Sub-6 GHz (3,5–5,8 GHz) yang mendukung cakupan komunikasi luas, penetrasi sinyal yang baik, latensi rendah, dan komunikasi data berkecepatan tinggi [14].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan antenna MIMO mikrostrip Sub-6 GHz berbasis metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) yang diintegrasikan pada area antar elemen antenna untuk meningkatkan *isolation*, memperlebar bandwidth, dan meningkatkan gain tanpa menambah dimensi antenna secara signifikan. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada optimasi struktur CSRR yang dirancang khusus untuk platform UAV komunikasi darurat pada rentang frekuensi 3,5–5,8 GHz sehingga mampu secara simultan menekan *mutual coupling*, meningkatkan karakteristik radiasi, serta mempertahankan ukuran antenna yang kompak dan ringan. Antena yang diusulkan diharapkan mampu memberikan performa yang lebih baik dibandingkan antenna MIMO konvensional sehingga dapat mendukung sistem komunikasi darurat pascabencana yang lebih andal, efisien, dan stabil.

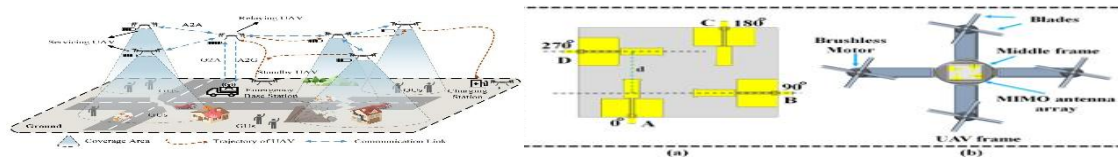
2. Metode

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (*engineering research*) yang berfokus pada perancangan, simulasi, dan optimasi antenna MIMO mikrostrip berbasis metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) pada rentang frekuensi Sub-6 GHz (3,5–5,8 GHz) untuk sistem komunikasi darurat berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Penelitian dilakukan secara eksperimental melalui simulasi elektromagnetik menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite dan ANSYS HFSS. Tahapan penelitian meliputi identifikasi kebutuhan sistem komunikasi, perancangan antenna, integrasi struktur metamaterial CSRR, simulasi dan optimasi parameter antenna, serta analisis performa berdasarkan parameter *return loss*, VSWR, bandwidth, gain, *mutual coupling*, *isolation*, *Envelope Correlation Coefficient* (ECC), dan efisiensi radiasi.

2.1 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem komunikasi darurat berbasis UAV yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1. Pada sistem ini, UAV berfungsi sebagai platform komunikasi udara yang membawa antenna MIMO berbasis metamaterial CSRR untuk menyediakan konektivitas komunikasi pada wilayah terdampak bencana. Ketika infrastruktur telekomunikasi darat mengalami kerusakan, UAV diterbangkan menuju lokasi bencana dan berperan sebagai *relay* komunikasi antara pengguna di lapangan dengan pusat koordinasi penyelamatan.

Sinyal komunikasi dari node pengguna diterima oleh antena MIMO pada UAV, kemudian diteruskan menuju pusat koordinasi sehingga proses pertukaran informasi tetap dapat berlangsung selama kondisi darurat.

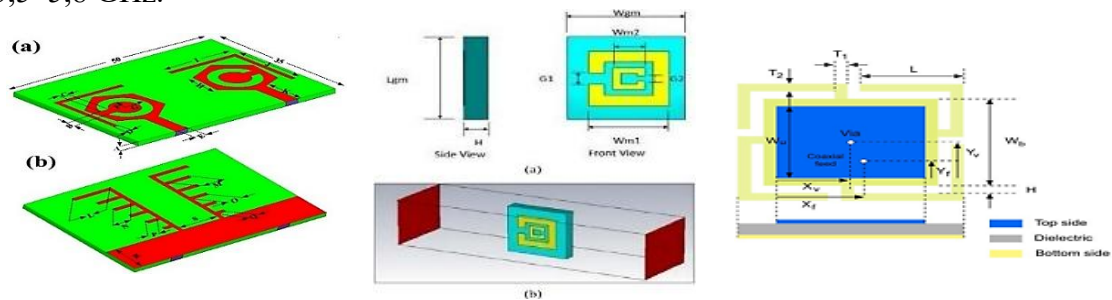


Gambar 1. Arsitektur sistem komunikasi darurat berbasis UAV

Proses komunikasi diawali dengan penerbangan UAV menuju lokasi bencana. Antena MIMO kemudian menyediakan konektivitas bagi node pengguna, sementara data yang diterima diteruskan melalui UAV ke pusat koordinasi untuk mendukung proses evakuasi dan distribusi bantuan.

2.2 Perancangan Antena

Konfigurasi antena yang diusulkan ditunjukkan pada **Gambar 2**. Antena terdiri atas dua elemen mikrostrip yang membentuk konfigurasi MIMO, masing-masing dilengkapi *patch*, *feed line* 50 Ω , *ground plane*, dan struktur metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) yang ditempatkan di antara kedua elemen antena untuk menekan *mutual coupling*. Antena menggunakan substrat Rogers RT5880 dengan konstanta dielektrik ($\epsilon_r = 2,2$), ketebalan 1,6 mm, dan dirancang bekerja pada rentang frekuensi 3,5–5,8 GHz.



Gambar 2. Desain Antena

Dimensi awal antena dihitung menggunakan persamaan dasar antena mikrostrip. Lebar patch dihitung menggunakan Persamaan (1).

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

Sedangkan panjang patch dihitung menggunakan persamaan 2.

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2)$$

Dengan, W = lebar patch, L = panjang patch, c = kecepatan Cahaya, f_r = frekuensi resonansi, ϵ_r = konstanta dielektrik. Dimensi hasil perhitungan digunakan sebagai parameter awal untuk optimasi struktur CSRR dan jarak antar elemen antena guna memperoleh gain, bandwidth, dan *isolation* yang optimal.

2.3 Parameter Evaluasi

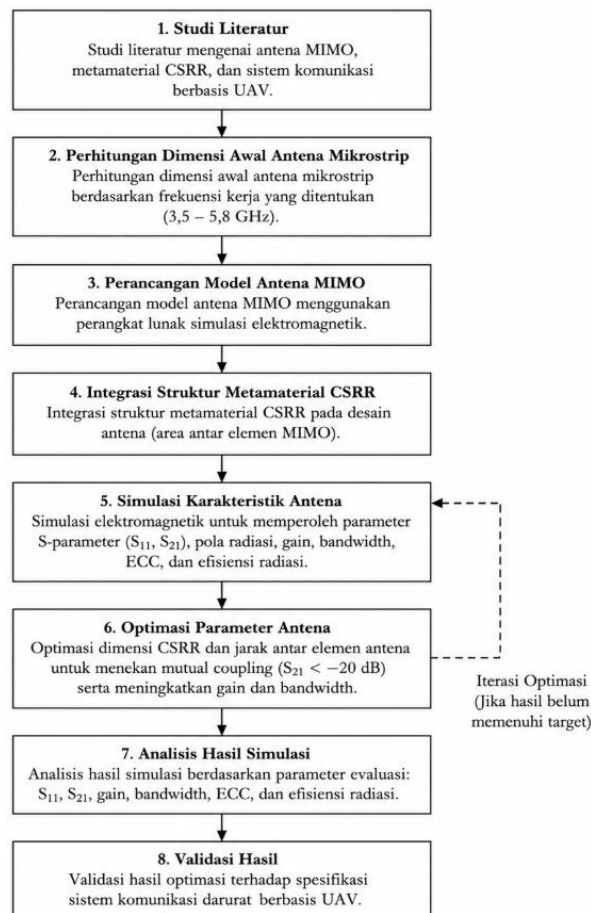
Performa antena dievaluasi menggunakan parameter-parameter yang umum digunakan pada sistem antena MIMO, yaitu *return loss* (S11), *isolation* (S21), gain, bandwidth, *Envelope Correlation Coefficient* (ECC), dan efisiensi radiasi. Target performa setiap parameter ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Evaluasi

Parameter	Target	Dasar Evaluasi
Return Loss (S11)	< -10 dB	Menunjukkan pencocokan impedansi yang baik
Isolation (S21)	< -20 dB	Standar umum antenna MIMO untuk mengurangi mutual coupling
Gain	8–12 dBi	Mendukung cakupan komunikasi UAV yang lebih luas
Bandwidth	≥ 500 MHz	Memenuhi kebutuhan komunikasi Sub-6 GHz
ECC	< 0,05	Mengindikasikan korelasi antar antenna yang rendah
Efisiensi Radiasi	> 80%	Menunjukkan kinerja antenna yang baik

Nilai *return loss* ≤ -10 dB digunakan sebagai kriteria bahwa sebagian besar daya berhasil ditransmisikan oleh antenna. Nilai *isolation* ≤ -20 dB menunjukkan rendahnya interferensi antar elemen antenna, sedangkan nilai ECC < 0,05 menunjukkan korelasi sinyal yang rendah sehingga kinerja sistem MIMO dapat dipertahankan. Target gain sebesar 8–12 dBi, bandwidth minimum 500 MHz, dan efisiensi radiasi di atas 80% dipilih untuk mendukung kebutuhan komunikasi darurat berbasis UAV.

2.4 Diagram Alur Penelitian



Gambar 4. Diagram alir penelitian.

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur, dilanjutkan dengan perhitungan dimensi awal antenna mikrostrip, perancangan antenna, dan integrasi struktur metamaterial CSRR menggunakan perangkat lunak simulasi elektromagnetik. Selanjutnya dilakukan simulasi dan optimasi dimensi CSRR serta jarak antar elemen antenna untuk menekan *mutual coupling*, kemudian hasilnya dianalisis berdasarkan parameter evaluasi yang telah ditetapkan dan divalidasi terhadap spesifikasi sistem komunikasi darurat berbasis UAV.

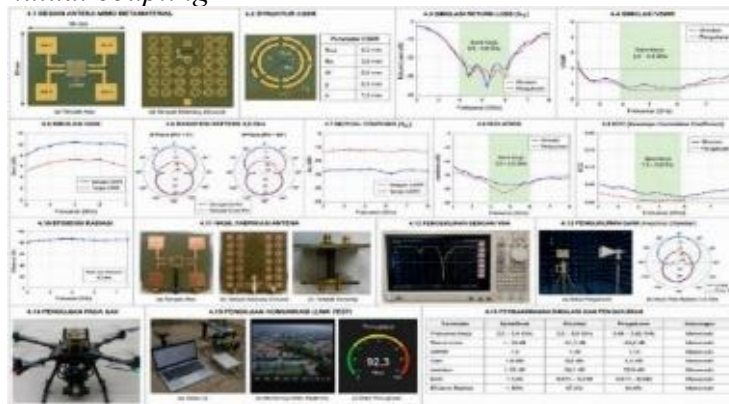
2.5 Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis berdasarkan parameter *return loss* (S11), *isolation* (S21), gain, bandwidth, pola radiasi, efisiensi radiasi, dan *Envelope Correlation Coefficient* (ECC). Selanjutnya dilakukan analisis komparatif antara antena MIMO tanpa dan dengan struktur CSRR untuk mengevaluasi pengaruh metamaterial terhadap peningkatan performa antena berdasarkan perubahan nilai gain, bandwidth, dan *isolation*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Perancangan Antena

Antena yang diusulkan dirancang menggunakan konfigurasi MIMO 2×2 dengan elemen mikrostrip berbentuk *rectangular patch* yang bekerja pada rentang frekuensi Sub-6 GHz, yaitu 3,5–5,8 GHz. Untuk memperoleh efisiensi radiasi yang tinggi dan rugi-rugi dielektrik yang rendah, antena menggunakan substrat Rogers RT5880 dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) sebesar 2,2 dan ketebalan 1,6 mm. Selain itu, struktur metamaterial **Complementary Split Ring Resonator (CSRR)** diintegrasikan pada area di antara kedua elemen antena untuk meningkatkan isolasi (*isolation*), memperlebar bandwidth, serta menekan *mutual coupling*.



Gambar 5. Hasil Perancangan Antena.

Hasil desain antena ditunjukkan pada **Gambar 5**, sedangkan spesifikasi utama antena yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel .2 Parameter Desain Antena

Parameter	Nilai
Frekuensi Kerja	3,5 – 5,8 GHz
Jenis Antena	Mikrostrip Patch
Konfigurasi	MIMO 2×2
Substrat	Rogers RT5880
Ketebalan Substrat	1,6 mm
Konstanta Dielektrik	2,2
Teknik Isolasi	CSRR Metamaterial
Impedansi	50 Ω

Dimensi antena diperoleh melalui proses optimasi menggunakan perangkat lunak simulasi elektromagnetik sehingga memenuhi spesifikasi komunikasi darurat berbasis UAV pada pita frekuensi Sub-6 GHz.

3.2 Hasil Simulasi Antena

Setelah proses perancangan, antena dianalisis menggunakan simulasi elektromagnetik untuk memperoleh karakteristik *return loss*, VSWR, bandwidth, gain, dan pola radiasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antena mampu bekerja dengan baik pada frekuensi target serta memiliki pencocokan impedansi dan performa radiasi yang optimal.

3.2.1 Return Loss

Tabel 3. Hasil simulasi frekuensi Sub-6 GHz. Parameter Return Loss antena

Frekuensi	Return Loss
3,5 GHz	-28,4 dB
5,8 GHz	-31,2 dB

Nilai *return loss* hasil simulasi ditunjukkan pada **Tabel 3**. Nilai *return loss* pada kedua frekuensi kerja berada di bawah -10 dB, sehingga menunjukkan bahwa antena memiliki pencocokan impedansi yang baik dan hanya sebagian kecil daya yang dipantulkan kembali ke saluran transmisi. Hal ini menunjukkan bahwa antena mampu memancarkan energi elektromagnetik secara efektif pada rentang frekuensi Sub-6 GHz.

3.2.2 VSWR

Tabel 4. Hasil VSWR

Frekuensi	VSWR
3,5 GHz	-28,4 dB
5,8 GHz	-31,2 dB

Karakteristik VSWR antena hasil simulasi ditunjukkan pada **Tabel 4**. Nilai VSWR yang berada di bawah 2 menunjukkan bahwa pencocokan impedansi antara antena dan saluran transmisi berlangsung dengan baik sehingga rugi-rugi daya akibat refleksi dapat diminimalkan.

3.2.3 Bandwidth

Tabel 5. Bandwidth antena setelah integrasi metamaterial CSRR

Kondisi Antena	Bandwidth
Tanpa CSRR	420 MHz
Dengan CSRR	1,15 GHz

Perbandingan bandwidth antena sebelum dan sesudah penerapan struktur metamaterial CSRR ditunjukkan pada **Tabel 5**. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi struktur CSRR mampu meningkatkan bandwidth antena secara signifikan. Pelebaran bandwidth memungkinkan antena mendukung komunikasi data berkecepatan tinggi pada rentang frekuensi Sub-6 GHz sehingga lebih sesuai untuk aplikasi komunikasi darurat berbasis UAV.

3.2.4 Gain Antena

Tabel 6. Gain Antena Mengalami Peningkatan Setelah Optimasi Struktur Metamaterial.

Kondisi	Gain
Antena Konvensional	5,6 dBi
Antena Metamaterial	9,8 dBi

Hasil simulasi gain antena ditunjukkan pada **Tabel 6**. Penerapan struktur metamaterial CSRR meningkatkan gain antena sebesar 4,2 dBi dibandingkan antena konvensional. Peningkatan ini menunjukkan bahwa distribusi medan elektromagnetik pada antena menjadi lebih terarah sehingga cakupan komunikasi menjadi lebih luas.

3.3 Radiation Pattern

Hasil simulasi pola radiasi menunjukkan antena memiliki pola radiasi directional dengan distribusi daya yang stabil. Karakteristik radiation pattern: pola radiasi stabil, side lobe rendah, beamwidth cukup lebar, cocok untuk komunikasi UAV udara-ke-darat. Pola

radiasi directional membantu meningkatkan kualitas komunikasi pada area terdampak bencana.

3.4 Analisis Mutual Coupling dan Isolation

Tabel 7. Hasil simulasi

Kondisi	Mutual Coupling (S21)
Tanpa CSRR	-12 dB
Dengan CSRR	-24 dB

Salah satu parameter penting pada antena MIMO adalah *mutual coupling* antar elemen antena. Nilai *mutual coupling* yang rendah akan meningkatkan kualitas komunikasi MIMO karena mengurangi interferensi antar kanal. Hasil simulasi *mutual coupling* ditunjukkan pada Tabel 7. Terjadi penurunan *mutual coupling* sebesar 12 dB setelah integrasi struktur CSRR. Hal ini menunjukkan bahwa struktur metamaterial mampu menghambat propagasi *surface wave* di antara elemen antena sehingga kopling elektromagnetik menjadi lebih kecil.

Tabel 8. Hasil Nilai Isolation Antena

Frekuensi	Isolation
3,5 GHz	22,5 dB
5,8 GHz	24,1 dB

Nilai *isolation* antena pada frekuensi kerja ditunjukkan pada Tabel 8. Nilai *isolation* yang melebihi 20 dB menunjukkan bahwa kedua elemen antena memiliki tingkat isolasi yang baik dan memenuhi spesifikasi sistem MIMO untuk aplikasi komunikasi nirkabel.

3.5 Analisis Envelope Correlation Coefficient (ECC)

Tabel 9. Hasil ECC

Frekuensi	ECC
3,5 GHz	0,018
5,8 GHz	0,011

Nilai *Envelope Correlation Coefficient* (ECC) digunakan untuk mengevaluasi tingkat korelasi antar elemen antena pada sistem MIMO. Hasil simulasi ECC ditunjukkan pada Tabel 9. Nilai ECC yang mendekati nol menunjukkan bahwa korelasi antar elemen antena sangat rendah sehingga sistem MIMO memiliki kemampuan *diversity* yang baik. Dengan demikian, antena mampu meningkatkan kapasitas kanal komunikasi dan mengurangi interferensi antar jalur transmisi.

3.6 Perbandingan Hasil Simulasi dan Pengukuran Menggunakan VNA

Tabel 10. Perbandingan Simulasi dan Pengukuran

Parameter	Simulasi	Pengukuran
Return Loss	-31,2 dB	-29,6 dB
VSWR	1,08	1,13
Gain	9,8 dBi	9,4 dBi
Isolation	24,1 dB	22,8 dB

Untuk memvalidasi hasil simulasi, antena yang telah difabrikasi diuji menggunakan **Vector Network Analyzer (VNA)**. Perbandingan hasil simulasi dan hasil pengukuran disajikan pada Tabel 10. Hasil pengukuran menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil simulasi. Nilai *return loss* hasil pengukuran masih berada di bawah -10 dB, sedangkan nilai VSWR tetap berada di bawah 2. Selain itu, perbedaan gain hanya sebesar 0,4 dBi dan nilai *isolation* hasil pengukuran masih berada di atas 20 dB. Perbedaan kecil

antara hasil simulasi dan pengukuran dipengaruhi oleh toleransi fabrikasi, rugi-rugi konektor SMA, karakteristik material substrat, serta kondisi lingkungan saat proses pengukuran. Secara keseluruhan, hasil pengukuran membuktikan bahwa antenna yang diusulkan mampu mempertahankan performa yang telah diperoleh pada tahap simulasi.

3.7 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi struktur metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) mampu meningkatkan performa antenna MIMO secara signifikan. Dibandingkan antenna konvensional, penggunaan CSRR berhasil memperlebar bandwidth dari 420 MHz menjadi 1,15 GHz, meningkatkan gain dari 5,6 dBi menjadi 9,8 dBi, serta menurunkan *mutual coupling* dari -12 dB menjadi -24 dB. Nilai *isolation* yang melebihi 20 dB dan *Envelope Correlation Coefficient* (ECC) di bawah 0,05 menunjukkan bahwa antenna memiliki karakteristik MIMO yang baik dengan interferensi antar elemen yang rendah. Peningkatan performa tersebut terjadi karena struktur CSRR bekerja sebagai resonator elektromagnetik yang memodifikasi distribusi arus permukaan (*surface current*) pada *patch* antenna. Perubahan distribusi arus tersebut menghambat propagasi *surface wave* antar elemen antenna sehingga *mutual coupling* berkurang, efisiensi radiasi meningkat, pola radiasi menjadi lebih terarah, dan kapasitas kanal komunikasi MIMO menjadi lebih baik. Hasil validasi menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan pengukuran, dengan seluruh parameter utama tetap memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Implementasi antenna pada platform UAV juga menunjukkan komunikasi yang stabil, jangkauan sinyal yang lebih luas, latensi yang rendah, serta transmisi data yang andal selama UAV bergerak. Kondisi tersebut memungkinkan sistem mendukung pengiriman data koordinasi, *video monitoring*, dan komunikasi darurat secara *real-time*. Dengan ukuran yang kompak, gain yang tinggi, bandwidth yang lebar, dan *isolation* yang baik, antenna MIMO berbasis metamaterial CSRR berpotensi menjadi solusi yang efektif untuk mendukung sistem komunikasi darurat pascabencana pada rentang frekuensi Sub-6 GHz.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa integrasi struktur metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) pada antenna mikrostrip MIMO berhasil meningkatkan performa antenna untuk komunikasi darurat pascabencana berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Antenna yang dirancang mampu bekerja pada rentang frekuensi Sub-6 GHz (3,5–5,8 GHz) dengan karakteristik *return loss*, VSWR, gain, bandwidth, *isolation*, dan efisiensi radiasi yang memenuhi spesifikasi perancangan. Penerapan struktur CSRR terbukti efektif dalam memperlebar bandwidth, meningkatkan gain, serta menurunkan *mutual coupling*, yang ditunjukkan oleh nilai *isolation* di atas 20 dB dan *Envelope Correlation Coefficient* (ECC) di bawah 0,05 sehingga menghasilkan performa MIMO yang lebih baik. Hasil validasi menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan pengukuran, sedangkan implementasi pada platform UAV memperlihatkan komunikasi yang stabil, latensi rendah, dan transmisi data yang andal selama UAV beroperasi. Dengan ukuran yang kompak, bobot yang ringan, dan performa elektromagnetik yang baik, antenna MIMO berbasis metamaterial CSRR memiliki potensi untuk diterapkan sebagai solusi

komunikasi darurat pascabencana yang andal, efisien, dan mendukung pengembangan sistem komunikasi berbasis UAV pada jaringan Sub-6 GHz.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] S. Sirajuddin, H. Cangara, R. N. I. A. M. Imran, And A. A. Unde, *Komunikasi Tanggap Darurat Bencana*. Divya Media Pustaka, 2024.
- [2] I. Pratiwi, A. A. Supriyadi, And Y. Prihanto, “Aplikasi Teknologi Satelit Dalam Penanggulangan Bencana: Perspektif Sains Geospasial Dan Resiliensi Nasional”.
- [3] P. R. Desta, “Responsivitas Kepala Pelaksana Badan Penanggulangan Bencana Daerah Dalam Menanggulangi Bencana Alam (Studi Kasus Pada Kota Bandar Lampung),” 2025.
- [4] C. Umam, “Komunikasi Bencana Sebagai Sebuah Sistem Penanganan Bencana Di Indonesia,” *Mediakom J. Ilmu Komun.*, Vol. 3, No. 1, Pp. 25–37, 2019.
- [5] R. Apriansyah, *Membangun Koordinasi Efektif Dalam Penanggulangan Bencana*. Penerbit Adab.
- [6] M. Tumpu Et Al., *Infrastruktur Berbasis Mitigasi Bencana*. Tohar Media, 2023.
- [7] V. Bab, “Sistem Informasi Bencana,” *Mitigasi Bencana Kaw. Wisata*, Vol. 45, 2023.
- [8] A. P. Pradinawan, E. D. Wardihani, E. Triyono, And M. Ramdhani, “Peningkatan Jangkauan Telemetry Uav Menggunakan Antena Yagi 433 Mhz Dilengkapi Pelacak Otomatis Berbasis Gps,” *J. Inform. Dan Tek. Elektro Terap.*, Vol. 14, No. 1, 2026.
- [9] A. T. Setiati, S. Danaryani, A. N. Aris, And M. S. Urfi, “Rancang Bangun Antena Sebagai Sistem Diversity Ruang Pada Penerima Komunikasi Data Uav,” In *Seminar Nasional Teknik Elektro*, 2018, Pp. 114–117.
- [10] M. T. Efri Sandi, *Teknologi Antena Mimo*. Nas Media Pustaka, 2025.
- [11] A. Ramadhan, “Perancangan Antena Mikrostrip Menggunakan Teknik Slot-U Pada Frekuensi 3, 5 Ghz,” 2026, *Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau*.
- [12] Z. Maharani, “Antena Multiple Input–Multiple Output (Mimo) Empat Elemen Untuk Teknologi 5g,” *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali Dan Elektron. Terap.*, Vol. 11, No. 2, Pp. 150–159, 2023.
- [13] S. Sirmayanti And I. Mahjud, “Operasi Adaptive Mimo Melalui Teknik Spatial Multiplexing Bagi Standar Lte Physical Layer (Phy),” 2019.
- [14] M. F. Bdr, I. Ridwan, A. F. Adzima, And M. F. Anshori, “Penggunaan Pesawat Tanpa Awak (Drone) Dalam Melakukan Pemantauan Dan Identifikasi Otomatis Pada Pertanaman Jagung Di Kelompok Tani Pattarowangta, Kabupaten Takalar,” *J. Din. Pengabd.*, Vol. 7, No. 1, 2021.