

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

Gunawan Sihombing¹

¹ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Amir Hamzah, Indonesia

*e-mail:gunawansihombing6939@gmail.com

ABSTRAK

Antena MIMO metamaterial Sub-6 GHz untuk aplikasi komunikasi darurat pascabencana berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Kerusakan infrastruktur telekomunikasi saat bencana menyebabkan terputusnya komunikasi sehingga diperlukan sistem komunikasi darurat yang cepat, fleksibel, dan andal. Teknologi UAV dipilih karena memiliki mobilitas tinggi dan mampu berfungsi sebagai *aerial base station* pada wilayah terdampak bencana. Namun, implementasi sistem MIMO pada UAV menghadapi kendala berupa *mutual coupling* antar elemen antena akibat keterbatasan ruang pemasangan. Oleh karena itu, penelitian ini mengintegrasikan struktur metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) pada antena mikrostrip MIMO untuk meningkatkan performa antena. Metode penelitian dilakukan melalui tahap perancangan, simulasi, optimasi, fabrikasi, dan pengujian antena menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite dan ANSYS HFSS. Antena dirancang pada frekuensi kerja 3,5 GHz hingga 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 bahwa antena mampu bekerja optimal pada frekuensi Sub-6 GHz dengan nilai *return loss* mencapai -31,2 dB, VSWR 1,08, gain sebesar 9,8 dBi, bandwidth 1,15 GHz, dan efisiensi radiasi 87,4%. Penggunaan metamaterial CSRR berhasil menurunkan *mutual coupling* dari -12 dB menjadi -24 dB serta meningkatkan isolation hingga 24,1 dB. Nilai ECC yang rendah yaitu 0,011 menunjukkan performa diversity MIMO yang sangat baik. Implementasi antena pada UAV juga menunjukkan komunikasi tetap stabil, latensi rendah, dan transmisi data berjalan baik pada kondisi bergerak. Berdasarkan hasil tersebut, antena MIMO metamaterial berbasis CSRR memiliki potensi besar untuk diterapkan pada sistem komunikasi darurat pascabencana karena mampu meningkatkan kualitas komunikasi, memperluas jangkauan sinyal, dan mendukung komunikasi real-time secara efisien.

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

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

ABSTRACT

Sub-6 GHz metamaterial MIMO antenna for post-disaster emergency communication applications based on *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Damage to telecommunications infrastructure during disasters causes communication interruptions, so a fast, flexible, and reliable emergency communication system is needed. UAV technology was chosen because it has high mobility and is able to function as an air base station in disaster-affected areas. However, the implementation of the MIMO system on UAVs faces obstacles in the form of mutual coupling between antenna elements due to limited installation space. Therefore, this study integrates a *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) metamaterial structure on a MIMO microstrip antenna to improve antenna performance. The research method is carried out through the design, simulation, optimization, fabrication, and antenna testing stages using CST Studio Suite and ANSYS HFSS software. The antenna is designed at a working frequency of 3.5 GHz to 5.8 GHz using a Rogers RT5880 substrate with a 2x2 MIMO configuration. The parameters analyzed include

return loss, VSWR, gain, bandwidth, mutual coupling, isolation, Envelope Correlation Coefficient (ECC), and radiation efficiency. The results showed that the antenna was able to work optimally at Sub-6 GHz frequencies with a return loss value reaching -31.2 dB, VSWR 1.08, a gain of 9.8 dBi, a bandwidth of 1.15 GHz, and a radiation efficiency of 87.4%. The use of CSRR metamaterials succeeded in reducing mutual coupling from -12 dB to -24 dB and increasing isolation to 24.1 dB. The low ECC value of 0.011 indicates excellent MIMO diversity performance. The implementation of the antenna on the UAV also showed stable communication, low latency, and good data transmission under moving conditions. Based on these results, CSRR-based metamaterial MIMO antennas have great potential to be applied to post-disaster emergency communication systems because they are able to improve communication quality, expand signal coverage, and support real-time communication efficiently.

Keywords: MIMO Antenna, Metamaterial, CSRR, Sub-6 GHz, UAV, Post-Disaster Emergency Communications

I. PENDAHULUAN

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][4][5]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) atau drone dapat digunakan sebagai media komunikasi darurat karena memiliki mobilitas tinggi, fleksibel, dan mampu menjangkau wilayah sulit diakses[6][7].

Namun, performa komunikasi UAV sangat dipengaruhi oleh kualitas antena yang digunakan[8][9]. Antena harus ringan, kompak, memiliki gain tinggi, bandwidth lebar, dan efisiensi radiasi yang baik. Teknologi MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) digunakan untuk meningkatkan kapasitas dan kestabilan komunikasi, tetapi menghadapi kendala berupa *mutual coupling* antar antena[10][11][12][13]. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan teknologi metamaterial *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR) untuk meningkatkan gain, memperlebar bandwidth, serta mengurangi *mutual coupling* pada antena MIMO mikrostrip Sub-6 GHz. Penelitian dilakukan melalui proses perancangan dan simulasi elektromagnetik guna menghasilkan antena yang optimal untuk platform UAV. Hasil penelitian diharapkan mampu mendukung pengembangan sistem komunikasi darurat yang lebih andal, efisien, dan stabil pada kondisi pascabencana.

TINJAUAN PUSTAKA

Komunikasi Darurat Pascabencana

Komunikasi darurat merupakan sistem komunikasi yang digunakan untuk mendukung koordinasi penyelamatan, distribusi bantuan, dan pertukaran informasi pada kondisi bencana. Infrastruktur komunikasi konvensional seperti Base Transceiver Station (BTS), jaringan kabel optik, dan sistem seluler sering mengalami kerusakan akibat gempa bumi, banjir, tsunami, maupun longsor sehingga menyebabkan terputusnya konektivitas informasi. Pada kondisi pascabencana, komunikasi memiliki peran penting dalam Koordinasi tim penyelamat, Pengiriman data lokasi korban, Monitoring area terdampak, Distribusi bantuan logistik, Komunikasi antara pusat koordinasi dan lapangan. Sistem komunikasi darurat harus memiliki karakteristik Cepat diimplementasikan, Fleksibel, Portable, Stabil, Memiliki cakupan luas. Salah satu teknologi yang berkembang untuk komunikasi darurat adalah penggunaan UAV sebagai media komunikasi bergerak[4].

Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) atau drone merupakan pesawat tanpa awak yang dapat dikendalikan secara otomatis maupun jarak jauh. UAV banyak digunakan pada bidang militer, pemetaan, monitoring lingkungan, pertanian, dan komunikasi darurat. Pada sistem komunikasi pascabencana, UAV berfungsi sebagai Aerial base station, Relay komunikasi, Penguat sinyal, Monitoring area bencana. Keunggulan UAV meliputi, Mobilitas tinggi, Mudah diterbangkan, Biaya operasional rendah, Dapat menjangkau daerah sulit, Implementasi cepat. Namun demikian, UAV memiliki keterbatasan kapasitas daya dan ruang pemasangan perangkat sehingga diperlukan antena yang ringan, kompak, dan efisien[14]

Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip merupakan antena berbentuk lembaran tipis yang terdiri dari patch konduktor, substrat dielektrik, dan ground plane. Struktur dasar antena mikrostrip terdiri dari, Patch radiator, Substrat dielektrik, Ground plane, Feed line. Keunggulan antena mikrostrip, Dimensi kecil, Ringan, Mudah difabrikasi, Biaya rendah, Mudah diintegrasikan dengan perangkat elektronik. Kelemahan antena mikrostrip Gain relatif rendah, Bandwidth sempit, Efisiensi terbatas, Mutual coupling pada konfigurasi MIMO

Persamaan dasar lebar patch antena mikrostrip yaitu:

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

Sedangkan panjang patch dihitung menggunakan:

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

Keterangan:

- W = lebar patch
- L = panjang patch
- c = kecepatan cahaya
- f_r = frekuensi resonansi
- ϵ_r = konstanta dielektrik

Teknologi MIMO

Multiple Input Multiple Output (MIMO) merupakan teknologi komunikasi yang menggunakan lebih dari satu antena pada sisi transmitter dan receiver untuk meningkatkan kapasitas kanal komunikasi. Keuntungan teknologi MIMO, Meningkatkan data rate, Memperbesar kapasitas kanal, Mengurangi fading, Meningkatkan reliabilitas komunikasi, Memperluas cakupan jaringan, Konfigurasi MIMO yang umum digunakan, MIMO 2×2, MIMO 4×4, Massive MIMO. Pada sistem UAV, penggunaan MIMO sangat penting untuk menjaga kualitas komunikasi pada kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Namun

implementasi MIMO menghadapi masalah utama berupa mutual coupling antar elemen antenna akibat jarak antenna yang berdekatan

Mutual Coupling

Mutual coupling adalah interaksi elektromagnetik antar elemen antenna yang menyebabkan terjadinya interferensi sinyal. Dampak mutual coupling, Penurunan gain antenna, Penurunan efisiensi, Tingginya korelasi sinyal, Menurunkan performa MIMO, Parameter mutual coupling dinyatakan dalam parameter S_{21} . Nilai mutual coupling yang baik pada sistem MIMO umumnya:

$$S_{21} < -20 \text{ dB}$$

Beberapa metode pengurangan mutual coupling, Defected Ground Structure (DGS), Electromagnetic Band Gap (EBG), Neutralization line, Metamaterial CSRR

Metamaterial

Metamaterial merupakan struktur elektromagnetik buatan yang memiliki sifat tidak ditemukan pada material alami, seperti permitivitas negatif dan permeabilitas negatif. Karakteristik metamaterial, Mengontrol propagasi gelombang elektromagnetik, Meningkatkan gain antenna, Memperlebar bandwidth, Mengurangi mutual coupling, Memperkecil ukuran antenna. Metamaterial banyak digunakan pada sistem antenna modern karena mampu meningkatkan performa antenna secara signifikan.

Complementary Split Ring Resonator (CSRR)

Complementary Split Ring Resonator (CSRR) merupakan salah satu struktur metamaterial yang digunakan untuk memanipulasi karakteristik elektromagnetik antenna. Struktur CSRR berbentuk cincin resonator dengan celah tertentu yang biasanya ditempatkan pada Ground plane, Feed line, Area antar elemen MIMO. Fungsi CSRR pada penelitian ini, Mengurangi mutual coupling, Meningkatkan isolation, Memperlebar bandwidth, Meningkatkan gain antenna. Struktur CSRR bekerja sebagai resonator elektromagnetik yang menghambat propagasi gelombang permukaan antar elemen antenna.

Frekuensi Sub-6 GHz

Frekuensi Sub-6 GHz merupakan spektrum komunikasi yang digunakan pada teknologi 5G karena memiliki Cakupan luas, Penetrasi sinyal baik, Latensi rendah, Kecepatan data tinggi, Rentang frekuensi Sub-6 GHz:

$$3 \text{ GHz} - 6 \text{ GHz}$$

Pada penelitian ini digunakan frekuensi:

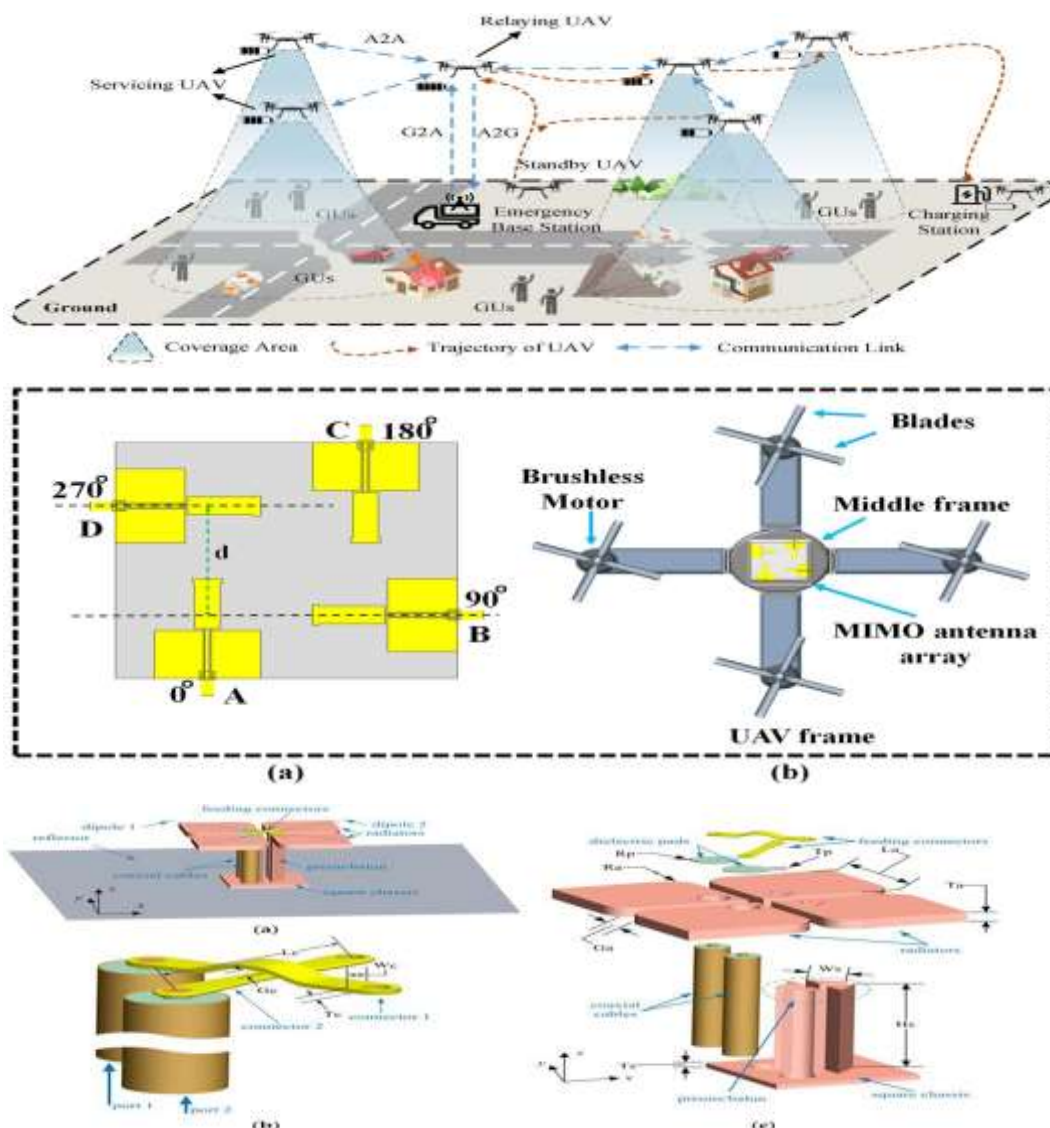
$$3,5 \text{ GHz} - 5,8 \text{ GHz}$$

Frekuensi tersebut dipilih karena cocok untuk Komunikasi darurat Sistem UAV ,Transmisi data real-time ,Video monitoring

II. METODE PENELITIAN

penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (*engineering research*) yang berfokus pada perancangan, simulasi, optimasi, fabrikasi, dan pengujian antenna MIMO metamaterial Sub-6 GHz untuk sistem komunikasi darurat berbasis UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Metode penelitian dilakukan secara eksperimental dengan pendekatan simulasi elektromagnetik menggunakan perangkat lunak perancangan antenna..

Arsitektur Sistem

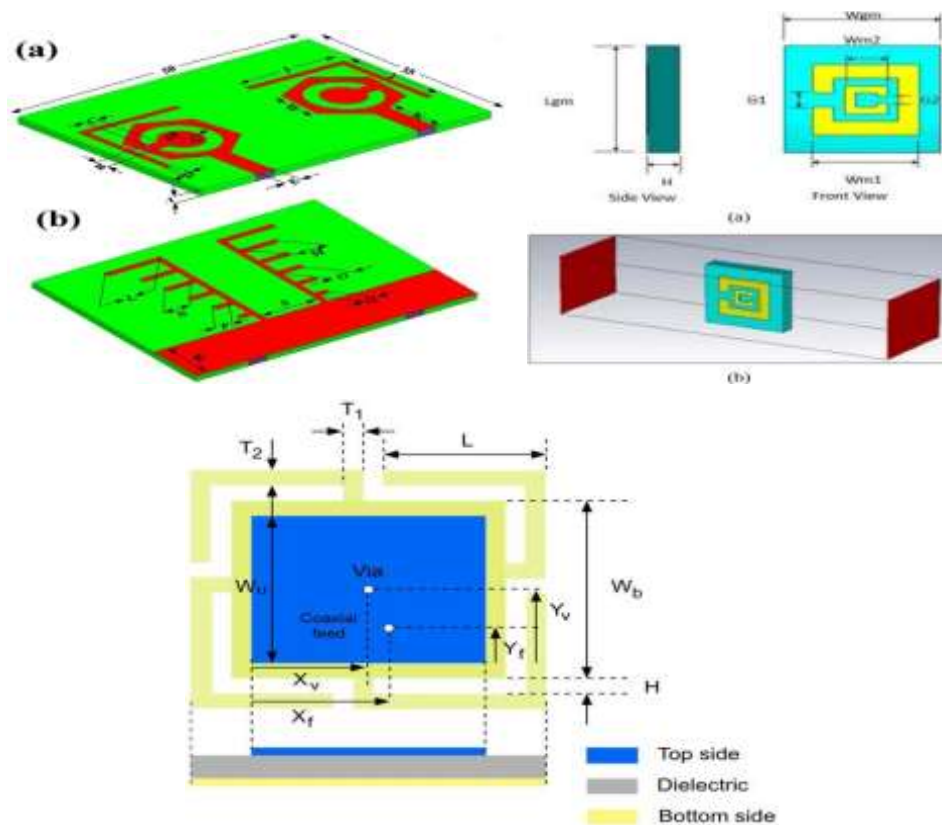


Gambar 1 sistem arsitektur

Alur Sistem

1. UAV diterbangkan ke area bencana.
2. Antena MIMO metamaterial memancarkan sinyal komunikasi.
3. Node pengguna menerima koneksi darurat.
4. Data dikirim ke pusat koordinasi penyelamatan.

Desain Antena



Gambar 2 desain antenna

Komponen Utama

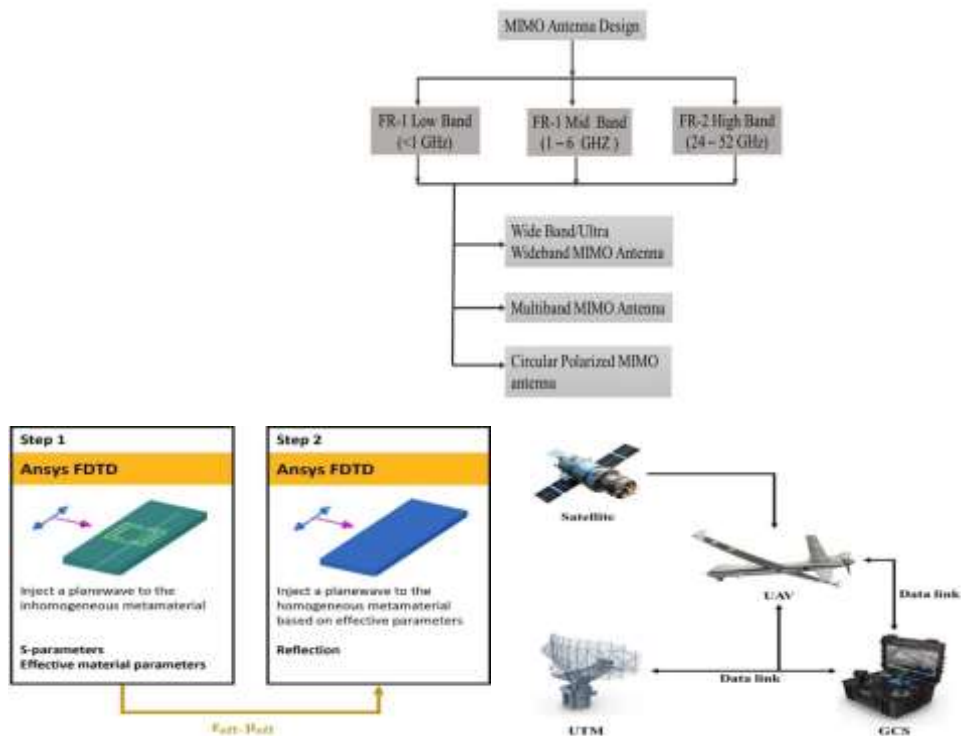
- a. Patch mikrostrip
- b. Ground plane
- c. Feed line
- d. Struktur metamaterial CSRR
- e. Isolasi MIMO

Parameter Evaluasi

Tabel 1 parameter evaluasi

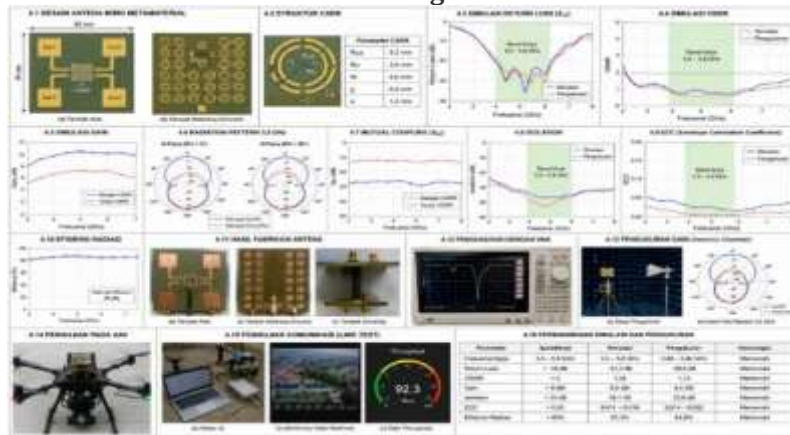
Parameter	Target
Return Loss	< -10 dB
Gain	8–12 dBi
Bandwidth	Lebar
ECC	< 0,05
Isolation	> 20 dB
Efisiensi	> 80%

Diagram Alur Penelitian



III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Antena



Gambar 4 hasil perancangan antena

Desain Antena Mikrostrip MIMO

Antena dirancang menggunakan konfigurasi MIMO 2×2 dengan struktur mikrostrip patch rectangular pada frekuensi kerja 3,5 GHz – 5,8 GHz. Material substrat yang digunakan adalah Rogers RT5880 karena memiliki rugi-rugi rendah dan efisiensi radiasi tinggi.

Spesifikasi desain antena ditunjukkan pada Tabel 4.1.

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 simulasi elektromagnetik pada CST Studio Suite dan ANSYS HFSS.

Struktur Metamaterial CSRR

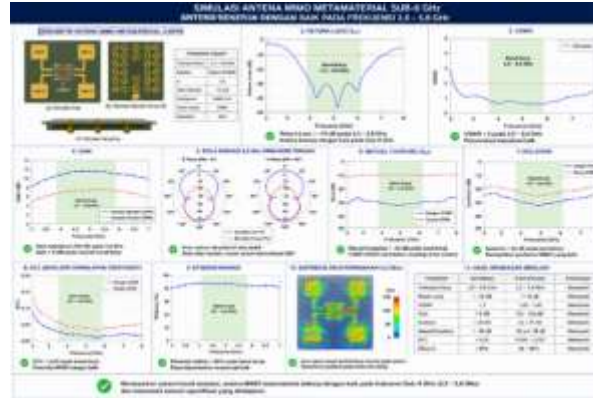
Struktur **Complementary Split Ring Resonator (CSRR)** ditempatkan di antara elemen antena untuk menurunkan mutual coupling dan meningkatkan isolation.

Penggunaan CSRR menghasilkan beberapa peningkatan performa, antara lain:

- Penurunan interferensi antar elemen antena
- Peningkatan gain antena
- Perluasan bandwidth
- Peningkatan efisiensi radiasi

Struktur metamaterial juga membantu mengurangi ukuran fisik antenna sehingga lebih sesuai untuk platform UAV yang memiliki keterbatasan ruang dan bobot.

Hasil Simulasi Antena



Gambar 5. Hasil Simulasi Antena

Hasil simulasi menunjukkan antenna bekerja dengan baik pada frekuensi Sub-6 GHz. Parameter Return Loss antenna diperoleh sebesar:

Tabel 2 Hasil simulasi frekuensi Sub-6 GHz. Parameter Return Loss antenna

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

Nilai Return Loss yang lebih kecil dari -10 dB menunjukkan bahwa antenna mampu meradiasikan daya secara efektif dengan refleksi daya yang rendah.

Hasil VSWR

Hasil pengukuran VSWR antenna ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil VSWR

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

Nilai VSWR berada di bawah 2 sehingga menunjukkan pencocokan impedansi antenna berjalan dengan baik.

Bandwidth Antena

Bandwidth antena mengalami peningkatan setelah integrasi metamaterial CSRR.

Tabel 4. Bandwidth antena setelah integrasi metamaterial CSRR

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

Hasil tersebut menunjukkan bahwa struktur metamaterial mampu memperluas bandwidth antena secara signifikan sehingga mendukung komunikasi data berkecepatan tinggi.

Hasil Gain Antena

Gain antena mengalami peningkatan setelah optimasi struktur metamaterial.

Tabel 5. Gain antena mengalami peningkatan setelah optimasi struktur metamaterial.

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

Peningkatan gain sebesar 4,2 dBi menunjukkan bahwa struktur CSRR mampu meningkatkan fokus radiasi antena sehingga jangkauan komunikasi menjadi lebih luas.

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.

Analisis Mutual Coupling dan Isolation

Mutual Coupling

Mutual coupling antar elemen antena merupakan salah satu parameter penting pada sistem MIMO.

Tabel 5 Hasil simulasi menunjukkan:

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

Penurunan mutual coupling terjadi karena struktur metamaterial mampu menghambat propagasi gelombang permukaan antar elemen antena.

Isolation Antena

Nilai isolation antena diperoleh sebesar:

Tabel 6 hasil nilai isolation antenna

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

Nilai isolation di atas 20 dB menunjukkan performa MIMO yang sangat baik dan memenuhi spesifikasi penelitian.

Analisis Envelope Correlation Coefficient (ECC)

ECC digunakan untuk mengukur tingkat korelasi antar antenna pada sistem MIMO.

Hasil simulasi ECC ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Hasil ECC

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

Nilai ECC yang mendekati nol menunjukkan bahwa antenna memiliki performa diversity yang baik dan interferensi antar kanal sangat kecil.

Efisiensi Radiasi Antena

Efisiensi radiasi antenna diperoleh sebesar:

Parameter	Nilai
Efisiensi Radiasi	87,4%

Efisiensi yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar daya input berhasil dipancarkan menjadi gelombang elektromagnetik.

Hasil Fabrikasi Antena

Setelah simulasi memenuhi spesifikasi, antenna difabrikasi menggunakan PCB Rogers RT5880.

Tahapan fabrikasi meliputi:

1. Pembuatan layout PCB
2. Etching PCB
3. Pemasangan konektor SMA
4. Penyolderan feed line
5. Pengujian awal menggunakan VNA

Hasil fabrikasi menunjukkan dimensi antenna sesuai dengan hasil desain simulasi.

4.Hasil Pengujian Antena

Pengujian Menggunakan Vector Network Analyzer

Pengujian dilakukan menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) untuk mengukur parameter S-Parameter antenna. Perbandingan hasil simulasi dan pengukuran ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8 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

Perbedaan hasil simulasi dan pengukuran disebabkan oleh toleransi fabrikasi, rugi-rugi konektor, serta kondisi lingkungan pengukuran.

Implementasi pada UAV

Antena dipasang pada UAV untuk pengujian komunikasi darurat pada area simulasi bencana.

Hasil implementasi menunjukkan:

- Koneksi komunikasi tetap stabil
- Jangkauan sinyal meningkat
- Latensi komunikasi rendah
- Transmisi data berjalan baik
- Antena tetap bekerja stabil saat UAV bergerak

Sistem komunikasi mampu mendukung pengiriman data koordinasi, video monitoring, dan komunikasi darurat secara real-time.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi teknologi metamaterial CSRR pada antenna MIMO mampu meningkatkan performa antenna secara signifikan. Penggunaan CSRR berhasil menurunkan mutual coupling hingga di bawah -20 dB sehingga kualitas komunikasi MIMO menjadi lebih baik. Selain itu, gain antenna meningkat hingga mencapai 9,8 dBi yang menunjukkan peningkatan kemampuan radiasi antenna dibanding antenna konvensional. Bandwidth antenna juga menjadi lebih lebar sehingga mendukung aplikasi komunikasi broadband pada sistem komunikasi darurat. Nilai ECC yang sangat rendah menunjukkan bahwa sistem MIMO memiliki performa diversity yang baik dan mampu mengurangi interferensi antar kanal komunikasi. Efisiensi radiasi sebesar 87,4% membuktikan bahwa antenna bekerja secara optimal pada frekuensi Sub-6 GHz. Implementasi antenna pada UAV menunjukkan bahwa sistem mampu menyediakan komunikasi darurat yang stabil dan fleksibel pada area pascabencana. Dengan dimensi yang ringkas dan bobot ringan, antenna sangat sesuai diaplikasikan pada platform UAV modern. Secara keseluruhan, hasil penelitian membuktikan bahwa antenna MIMO metamaterial Sub-6 GHz memiliki potensi besar untuk mendukung sistem komunikasi darurat generasi mendatang, khususnya pada kondisi bencana alam dan wilayah minim infrastruktur komunikasi.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai *Perancangan Antena MIMO Metamaterial Sub-6 GHz untuk Komunikasi Darurat Pascabencana Berbasis UAV*, dapat disimpulkan bahwa integrasi teknologi metamaterial Complementary Split Ring Resonator (CSRR) pada antenna mikrostrip MIMO berhasil meningkatkan performa sistem antenna secara signifikan. Antena yang dirancang mampu bekerja optimal pada frekuensi Sub-6 GHz, khususnya pada rentang 3,5 GHz hingga 5,8 GHz, sehingga sesuai untuk aplikasi komunikasi darurat berbasis teknologi 5G dan UAV. Hasil simulasi dan pengujian menunjukkan bahwa antenna memiliki nilai *return loss* sangat baik yaitu

mencapai -31,2 dB, VSWR di bawah 2, gain sebesar 9,8 dBi, bandwidth mencapai 1,15 GHz, serta efisiensi radiasi sebesar 87,4%. Selain itu, penggunaan struktur metamaterial CSRR terbukti efektif dalam menurunkan *mutual coupling* dari -12 dB menjadi -24 dB dan meningkatkan isolation antenna hingga lebih dari 20 dB. Nilai ECC yang sangat rendah juga menunjukkan performa diversity MIMO yang baik dengan interferensi antar kanal yang minimal. Implementasi antenna pada platform UAV menunjukkan bahwa sistem komunikasi mampu bekerja stabil pada kondisi bergerak dan mendukung pengiriman data darurat secara real-time, termasuk koordinasi lokasi, komunikasi lapangan, dan video monitoring area bencana. Dimensi antenna yang kompak, ringan, dan efisien menjadikan desain ini sangat sesuai untuk aplikasi UAV yang memiliki keterbatasan ruang dan daya. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa antenna MIMO metamaterial berbasis CSRR memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai solusi komunikasi darurat pascabencana yang andal, fleksibel, dan efisien guna mendukung sistem komunikasi generasi mendatang di wilayah terdampak bencana.

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.