



Integrasi Antena Biquad dengan Antenna Tracker untuk Optimasi Komunikasi Ground-UAV pada Platform Hybrid VTOL

Karimatun Nisa^{1*}, Okkie Puspitorini², Ari Wijayanti³, Muhammad Adib Fridiansya⁴, Raihan Giga Bajurah⁵

^{1,2,3,4} Teknik Telekomunikasi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

⁵ Teknik Mekatronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya, 60111

E-Mail *: nisa@pens.ac.id

ABSTRACT

Reliable communication between an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and the Ground Control Station (GCS) is essential for Hybrid VTOL long-range missions, where telemetry stability directly affects operational safety. Conventional monopole antennas provide low gain and omnidirectional radiation, limiting communication reliability and range. This study proposes the integration of a 433 MHz Biquad antenna with a GPS-based antenna tracking system to optimize telemetry performance. The antenna was designed, simulated, fabricated, and characterized using a Vector Network Analyzer (VNA). Measurement results show a return loss of -16.92 dB, VSWR of 1.33, impedance of 48.7Ω , and a bandwidth of ± 12 MHz under $VSWR \leq 1.5$, while simulation indicates a maximum gain of 10.49 dBi. Field testing through autonomous waypoint missions demonstrated stable communication up to 2.2 km, maintaining link quality above 80% within 1.5 km. Compared to a standard monopole antenna (stable up to approximately 1.2 km), the proposed system increases the effective communication range by approximately 83%. These results confirm that integrating a directional Biquad antenna with a tracking mechanism significantly enhances long-range UAV telemetry reliability.

Keywords: Hybrid VTOL UAV, Biquad Antenna, GCS, 433 MHz Telemetry, Antenna Tracking System

ABSTRAK

Komunikasi yang andal antara *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan *Ground Control Station* (GCS) sangat penting pada misi jarak jauh UAV *Hybrid VTOL* karena stabilitas telemetri berpengaruh langsung terhadap keselamatan operasi. Antena monopole konvensional umumnya memiliki gain rendah dan pola radiasi omnidireksional sehingga membatasi reliabilitas serta jangkauan komunikasi. Penelitian ini mengusulkan integrasi antena Biquad 433 MHz dengan sistem antenna tracker berbasis GPS untuk mengoptimalkan performa telemetri. Antena dirancang melalui simulasi elektromagnetik, difabrikasi, dan dikarakterisasi menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA). Hasil pengukuran menunjukkan return loss $-16,92$ dB, VSWR 1,33, impedansi $48,7 \Omega$, serta bandwidth ± 12 MHz pada batas $VSWR \leq 1,5$, dengan gain simulasi maksimum sebesar 10,49 dBi. Uji terbang *waypoint otonom* menunjukkan komunikasi stabil hingga 2,2 km dengan kualitas sinyal di atas 80% pada jarak 1,5 km. Dibandingkan antena monopole standar yang stabil hingga $\pm 1,2$ km, sistem yang diusulkan meningkatkan jangkauan efektif sekitar 83%. Hasil ini membuktikan bahwa integrasi antena terarah dan mekanisme *tracking* secara signifikan meningkatkan reliabilitas telemetri UAV jarak jauh.

Kata Kunci: UAV Hybrid VTOL, Antena Biquad, GCS, Telemetri 433 MHz, Sistem Antenna Tracker.

Naskah diterima 13 Februari 2026; Revisi 02 Maret 2026; Diterima 12 April 2026. Tanggal Publikasi 01 Maret 2026

Jurnal teknika berada pada lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

DOI : 10.30736/jt.v18i1.1631 Hal 137 -146



1. PENDAHULUAN

Pesatnya perkembangan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), khususnya tipe *Hybrid Vertical Take-Off and Landing* (VTOL), menuntut sistem komunikasi telemetri yang handal untuk menjamin keselamatan misi jarak menengah hingga jauh. Perkembangan komunikasi UAV dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan peningkatan signifikan dalam desain sistem jaringan dan arsitektur komunikasi nirkabel (Trinh et al., 2025; Mahbub et al., 2025; Hashim et al., 2025). Frekuensi 433 MHz banyak digunakan untuk telemetri jarak jauh karena karakteristik propagasinya yang lebih stabil dibanding frekuensi tinggi. Fenomena propagasi *air-to-ground* pada komunikasi UAV juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan dinamika pergerakan wahana (Wardihani et al., 2023). Meskipun demikian, penggunaan antena standar jenis *monopole* atau *rubber duck* bawaan modul telemetri sering kali tidak memadai untuk misi operasional karena gain yang rendah dan pola radiasi *omnidirectional* yang rentan terhadap *multipath fading*, sehingga membatasi jangkauan efektif dan stabilitas tautan komunikasi. Penggunaan antena *directional* pada sistem komunikasi UAV terbukti mampu meningkatkan kekuatan sinyal dan efisiensi transmisi dibanding antena *omnidirectional* pada sistem telemetri konvensional (Kelechi et al., 2021; Tyrovolas et al., 2021; Xiao 2021).

Antena *directional* seperti *Yagi* dan *Helical* memang mampu meningkatkan gain, namun memiliki dimensi dan kompleksitas mekanik yang lebih besar sehingga kurang praktis untuk sistem tracking portabel pada frekuensi 433 MHz. Oleh karena itu, antena Biquad dipilih karena menawarkan gain relatif tinggi (~10 dBi) dengan struktur lebih sederhana, dimensi lebih ringkas, serta kemudahan integrasi dengan antenna tracker berbasis servo. Pada frekuensi 433 MHz, panjang gelombang yang relatif besar ($\lambda \approx 69$ cm) menyebabkan dimensi fisik antena menjadi signifikan (Wardihani et al., 2023). Hal ini menimbulkan tantangan integrasi mekanik, khususnya dalam menjaga presisi arah radiasi saat digunakan pada sistem antenna tracker portabel.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa antena Biquad mampu meningkatkan gain dan direktivitas pada sistem telemetri 433 MHz. Namun, sebagian besar studi masih terbatas pada pengujian laboratorium tanpa validasi uji terbang nyata (Coyago et al., 2023). Implementasi pada frekuensi rendah (Sub-GHz) juga menunjukkan hasil positif, sebagaimana diteliti oleh (Haq & Kurniawan, 2022) yang berhasil mengoptimalkan desain antena biquad untuk sistem telemetri 433 MHz. Lebih lanjut,

modifikasi struktur untuk aplikasi wahana udara juga terus dikembangkan, seperti penelitian (Ta Thi et al., 2024) yang mengusulkan desain double biquad yang lebih aerodinamis, serta studi (Widianto et al., 2023), (Wijanarko, et al., 2022) yang membuktikan performa antena biquad untuk aplikasi telemetri UAV jarak jauh pada frekuensi 433 MHz.

Meskipun potensi antena biquad telah banyak dieksplorasi, tantangan utama dalam realisasi fisik antena ini adalah presisi dimensi. (Bustomi & Pramono, 2023) menjelaskan melalui model antena bi-polygonal bahwa perubahan sekecil apapun pada geometri bentuk fisik antena dapat menyebabkan pergeseran frekuensi kerja (*frequency shifts*) yang signifikan. Hal ini menegaskan bahwa perhitungan teoritis semata tidak cukup; diperlukan validasi pengukuran fisik dan optimalisasi dimensi agar antena bekerja tepat pada frekuensi resonansi yang diinginkan. Selain itu, terdapat kesenjangan (gap) ilmiah pada metode validasi performa, di mana sebagian besar studi terdahulu hanya berfokus pada pengujian laboratorium statis tanpa mengorelasikan hasil desain dengan data penerbangan nyata (*real-flight test*) di lingkungan dinamis.

Validasi performa antena di lingkungan operasional nyata seringkali menghadapi tantangan dalam hal akurasi akuisisi data. Pengukuran manual atau estimasi visual pada layar monitor GCS tidak cukup untuk memberikan data kuantitatif yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi standar sistem navigasi berbasis *open-source ArduPilot* yang memanfaatkan protokol komunikasi MAVLink (*Micro Air Vehicle Link*). MAVLink telah menjadi protokol standar industri untuk komunikasi bi-direksional antara UAV dan GCS karena efisiensinya dalam mengemas data telemetri yang kompleks. Penggunaan protokol ini memungkinkan pengambilan data parameter sinyal yang presisi. (Al-S'adi & Al-Hameed, 2024) menekankan bahwa analisis berbasis protokol MAVLink mampu mengidentifikasi potensi kerentanan dan peningkatan performa komunikasi UAV. Lebih lanjut, integrasi *framework ArduPilot* seperti yang diterapkan oleh (Hou dan Lin, 2022) menjamin stabilitas eksekusi misi otonom sekaligus pencatatan data (*logging*) secara *real-time*, sehingga memungkinkan pemetaan korelasi antara posisi geospasial UAV dan kekuatan sinyal (*Link Quality*) secara sinkron.

Berdasarkan latar belakang tersebut, kebaruan ilmiah (*scientific novelty*) dari penelitian ini terletak pada pendekatan validasi komprehensif yang menggabungkan perancangan antena biquad 433 MHz yang teroptimasi secara fisik dengan pengujian

lapangan berbasis data log MAVLink untuk menjamin akurasi analisis link quality. Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun antenna biquad 433 MHz yang memenuhi standar parameter impedansi dan VSWR, serta memvalidasi kinerjanya melalui uji terbang waypoint otonom guna menganalisis stabilitas komunikasi UAV saat menghadapi tantangan jarak dan obstruksi vegetasi.

2. METODE

2.1 Perancangan Struktur Geometris Antena

Metode penelitian ini dirancang untuk memastikan validitas perancangan antenna biquad 433 MHz melalui pendekatan sistematis yang mencakup perancangan teoritis, fabrikasi presisi, karakterisasi laboratorium, dan validasi operasional pada Wahana Udara Nirawak (UAV).

2.1.1 Penentuan Dimensi Dasar

Prinsip kerja antenna biquad didasarkan pada resonansi elemen *loop* tertutup dengan total keliling mendekati satu panjang gelombang (λ) untuk setiap *quad*. Langkah pertama adalah menentukan panjang gelombang referensi (λ_0) di ruang hampa menggunakan Persamaan (1) (Melvi, et al., 2023):

$$\lambda = \frac{c}{f_c} \quad (1)$$

Dimana c adalah kecepatan cahaya. Untuk frekuensi $f_c = 433$ MHz, diperoleh $\lambda_0 = 692,8$ mm. Berdasarkan teori, panjang sisi dasar setiap segmen *quad* adalah seperempat panjang gelombang ($\lambda/4$) (Coyago, et al., 2023).

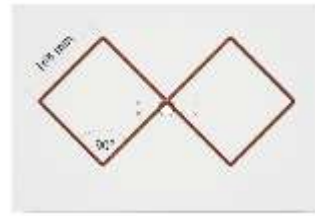
2.1.2 Perancangan Elemen Peradiasi (*Driven Element*)

Realisasi fisik elemen peradiasi menggunakan kawat tembaga pejal berdiameter 4,67 mm. Penggunaan material riil menuntut adanya koreksi dimensi akibat faktor kecepatan (velocity factor, $k \approx 0,97$) untuk mengkompensasi efek perlambatan fase gelombang pada permukaan konduktor (Davis, 2001).

Panjang fisik sisi elemen (L_{phy}) dihitung untuk memastikan resonansi tepat di 433 MHz, sebagaimana dirumuskan dalam Persamaan (2) (Munizah, et al., 2024) :

$$L_{phy} = k \frac{\lambda_0}{4} \approx 168 \text{ mm} \quad (2)$$

Detail dimensi elemen peradiasi hasil optimasi, termasuk sudut tekuk dan total bentangan kawat, ditunjukkan secara rinci pada Gambar 1.



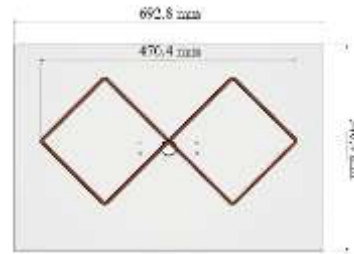
Gambar 1. Detail dimensi elemen peradiasi (*driven element*) hasil optimasi dengan panjang sisi $L_{phy} = 168$ mm.

2.1.3 Perancangan Dimensi Reflektor

Untuk mengarahkan pola radiasi (directivity) dan meminimalisir back-lobe, digunakan pelat reflektor aluminium datar. Dimensi reflektor ($H \times B$) dirancang melebihi luas penampang elemen peradiasi untuk mencegah difraksi tepi (edge diffraction) yang dapat merusak pola radiasi depan.

$$B = \frac{1}{2} \lambda_0, \quad H = \lambda_0 \quad (3)$$

Dimensi reflektor ditetapkan sebesar 692,8 mm \times 346,4 mm, yang secara proporsional mendekati $\lambda \times 0,5 \lambda$. Spesifikasi geometri reflektor disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Spesifikasi dimensi pelat reflektor ($H \times B$) untuk memaksimalkan *Front-to-Back Ratio*.

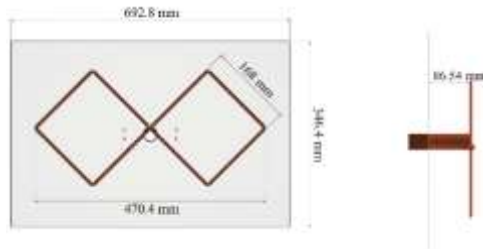
2.1.4 Konstruksi Lengkap dan Pencocokan Impedansi

Tahap akhir adalah integrasi elemen peradiasi dan reflektor. Parameter kritis pada tahap ini adalah jarak separasi (D) antara titik feedpoint elemen peradiasi dengan permukaan reflektor.

Jarak separasi diatur presisi pada

$$D = \frac{1}{8} \lambda_0 = 86.54 \text{ mm} \quad (4)$$

Pengaturan jarak ini berfungsi sebagai mekanisme transformasi impedansi intrinsik loop (120Ω) menjadi impedansi sistem telemetri (50Ω) tanpa memerlukan balun tambahan (Balanis, 2016). Visualisasi konstruksi lengkap diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Konstruksi lengkap antenna Biquad memperlihatkan jarak separasi (D) sebesar 86,54 mm untuk pencocokan impedansi 50Ω .

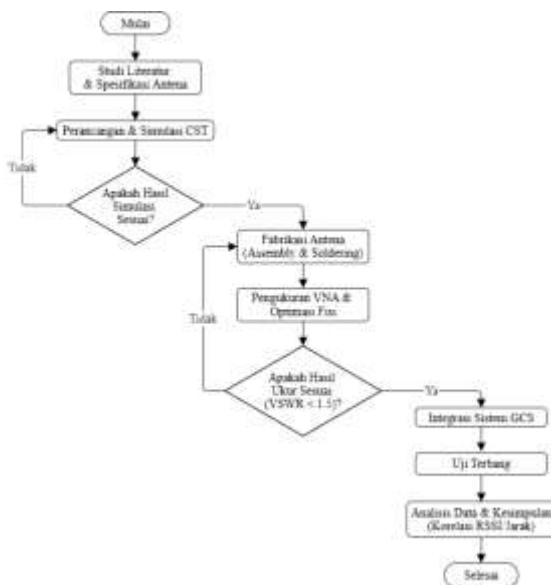
Berikut tabel hasil perhitungan dimensi fisik dari antenna biquad:

Tabel 1. Perhitungan dimensi fisik dari antenna biquad

Parameter	Nilai
Frekuensi kerja	433 MHz
Panjang gelombang (λ_0)	692.8 mm
Panjang sisi quad	168 mm
Tinggi total elemen	470.4 mm
Lebar reflektor (B)	346.4 mm
Tinggi reflektor (H)	692.8 mm
Jarak separasi (D)	86.54 mm
Diameter kawat	5 mm

2.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dirancang agar seluruh tahapan mulai dari perancangan antenna hingga pengujian lapangan dapat dilakukan secara sistematis, terukur, serta dapat direplikasi. Pendekatan yang diterapkan bersifat bertingkat, dimulai dari perhitungan teoretis berbasis parameter desain, dilanjutkan dengan simulasi numerik, fabrikasi fisik, verifikasi karakteristik RF di laboratorium, hingga validasi performa operasional melalui uji terbang UAV. Alur penelitian secara visual disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir prosedur penelitian perancangan dan validasi antenna Biquad.

2.3 Teknik Akuisisi dan Pengolahan Data Telemetri

Untuk menjamin validitas data pengujian lapangan, penelitian ini menerapkan metode akuisisi data deterministik berbasis protokol komunikasi MAVLink (*Micro Air Vehicle Link*) pada ekosistem autopilot ArduPilot.

Data kekuatan sinyal direkam secara real-time melalui parameter $RSSI$ dalam paket pesan $RADIO_STATUS$. Mengingat modul telemetri komersial (SiK Radio) tidak menyediakan luaran nilai $RSSI$ absolut (dBm) secara langsung kepada pengguna, data yang diakuisisi berupa persentase Kualitas Tautan (*Link Quality*), seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$LQ\% = \frac{RSSI_{meas} - RSSI_{min}}{RSSI_{max} - RSSI_{min}} \times 100\% \quad (5)$$

Nilai persentase ini merupakan hasil normalisasi linear yang dilakukan oleh firmware radio berdasarkan sensitivitas penerima, dengan formulasi pendekatan sebagai berikut:

Dalam persamaan tersebut, $LQ\%$ merepresentasikan Kualitas Tautan (*Link Quality*) dalam persentase, $RSSI_{meas}$ adalah nilai kekuatan sinyal terukur saat itu dalam satuan dBm, $RSSI_{min}$ merupakan ambang batas sensitivitas penerima (*noise floor*) pada kisaran -117 dBm, dan $RSSI_{max}$ adalah nilai sinyal saturasi maksimum pada kisaran -50 dBm.

Data yang tersimpan dalam *DataFlash Logs* kemudian diekstraksi untuk memetakan korelasi antara posisi geospasial UAV (*latitude, longitude, altitude*) dengan degradasi sinyal yang terjadi.

2.4 Skenario Pengujian Lapangan

Mengingat pola radiasi antenna Biquad yang memusat (*narrow beamwidth*), ketepatan sudut hadap (*pointing accuracy*) menjadi variabel krusial. Ketidaktepatan penunjukan arah dapat menyebabkan kerugian daya (*pointing loss*) yang signifikan. Oleh karena itu, sistem *Antenna Tracker* digunakan untuk menghitung sudut Azimuth (α) dan Elevasi (θ) secara *real-time* berdasarkan selisih koordinat geospasial antara GCS (titik referensi) dan UAV (target).

Sistem antenna tracker digunakan untuk menjaga arah pancaran antenna agar tetap mengarah ke UAV. Pendekatan beam alignment pada sistem komunikasi UAV telah banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi link komunikasi pada jaringan bergerak (Bai et al., 2024; Alam et al., 2024). Sistem antenna tracker menggunakan motor servo tipe FH6-1538 2A 12V pada sumbu yaw (azimuth) dan motor gear PG42 pada sumbu tilt (elevasi). Motor FH6-1538 digunakan untuk rotasi horizontal karena memiliki kemampuan torsi tinggi dan respons sudut yang stabil pada tegangan 12V, sedangkan motor PG42 dipilih untuk pergerakan vertikal karena memiliki karakteristik torsi besar dengan reduksi gear yang sesuai untuk menopang beban antenna. Mengingat antenna Biquad 433 MHz memiliki dimensi relatif besar, sistem dirancang dengan margin torsi yang cukup untuk

mengantisipasi beban statis dan pengaruh wind load. Untuk meningkatkan akurasi penunjukan arah, data koordinat GPS difilter secara sederhana sebelum dikonversi menjadi sudut azimuth dan elevasi, sehingga dapat meminimalkan jitter saat UAV bermanuver.

Sudut azimuth dan elevasi dihitung berdasarkan selisih koordinat GPS UAV dan GCS menggunakan algoritma navigasi standar untuk menjaga alignment antena secara real-time. Mengacu pada algoritma navigasi standar yang dijelaskan oleh (Grewal et al., 2013) formulasi vektor arah berdasarkan data Lintang (Lat) dan Bujur (Lon) ditentukan melalui Persamaan (4):

$$\alpha = \text{atan2}(X, Y) \quad (6)$$

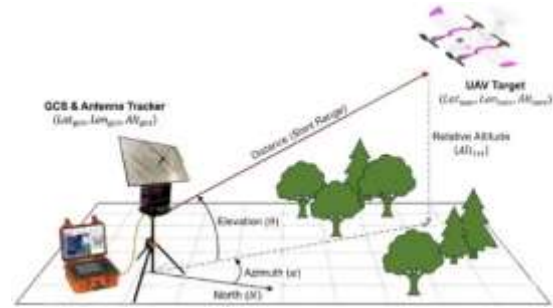
dimana komponen X dan Y didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned} X &= \cos(Lat_{uav}) \sin(Lon_{uav} - Lon_{gcs}) \\ Y &= \cos(Lat_{gcs}) \sin(Lat_{uav}) \\ &\quad - \sin(Lat_{gcs}) \cos(Lat_{uav}) \cos(Lon_{uav} \\ &\quad - Lon_{gcs}) \end{aligned}$$

Sementara itu, sudut Elevasi (θ) dihitung menggunakan pendekatan geometri Euclidean sederhana dengan asumsi *flat-earth model* untuk jarak pandang pendek (*Line-of-Sight*), sebagaimana divalidasi penggunaannya pada sistem *tracking* jarak dekat (Beard dan McLain, 2012). Perhitungan didasarkan pada korelasi antara ketinggian relatif (Alt_{rel}) dan jarak mendatar ($Distance$), sebagaimana ditentukan melalui Persamaan (5) dan diilustrasikan pada Gambar 5:

$$\theta = \arctan\left(\frac{Alt_{uav} - Alt_{gcs}}{Distance}\right) \quad (7)$$

Penerapan algoritma ini menjamin bahwa *main lobe* antena Biquad selalu tegak lurus terhadap posisi UAV, meminimalkan faktor *fading* akibat kesalahan orientasi. Koordinat GPS UAV dan GCS diproses untuk memperoleh sudut azimuth dan elevasi relatif. Sudut azimuth dihitung berdasarkan perbedaan koordinat lintang dan bujur, sedangkan sudut elevasi ditentukan dari selisih ketinggian dan jarak horizontal. Nilai sudut yang diperoleh kemudian dipetakan secara linier ke rentang sinyal PWM untuk menggerakkan motor yaw dan tilt. Proses pemetaan ini memastikan bahwa perubahan posisi UAV secara real-time diterjemahkan menjadi pergerakan mekanik antena yang proporsional. Rentang sudut 0–180° dipetakan ke pulsa PWM 1000–2000 μ s dengan frekuensi 50 Hz.



Gambar 5. Geometri penentuan sudut Azimuth dan Elevasi antara GCS dan UAV untuk mekanisme penjejakkan sinyal

Untuk Implementasi skenario uji terbang divisualisasikan pada Gambar 6. Rencana misi (*flight plan*) disusun menggunakan serangkaian *waypoint* linier yang membentang menjauhi titik *Home* hingga mencapai batas jangkauan target. Sebagaimana terlihat pada citra satelit latar belakang GCS, jalur penerbangan sengaja diarahkan melintasi area dengan variasi vegetasi. Pemilihan lokasi ini bertujuan untuk menciptakan kondisi pengujian realistis (*real-world environment*) di mana sinyal radio rentan mengalami penyerapan (*absorption*) dan pemantulan (*multipath*) oleh objek alam, sehingga ketangguhan antena Biquad dapat diuji secara komprehensif.



Gambar 6. Visualisasi rencana misi penerbangan (*flight plan*) pada antarmuka GCS yang menunjukkan penempatan *waypoint* secara linier melintasi area vegetasi.

Pada setiap *waypoint*, parameter telemetri yang direkam secara *real-time* meliputi posisi geospasial UAV (*latitude, longitude, altitude*), jarak *slant range* terhadap GCS, sudut azimuth *tracker*, serta persentase kekuatan sinyal. Kombinasi data ketinggian dan jarak tersebut kemudian diolah untuk menurunkan nilai sudut elevasi (*Angle of Arrival - AoA*). Pengolahan data ini memungkinkan analisis korelasi antara performa penerimaan sinyal antena terhadap dinamika orientasi dan posisi ketinggian terbang UAV. Selain itu, dataset tersebut digunakan untuk mengidentifikasi kondisi kritis, khususnya ketika UAV berada pada posisi dengan sudut AoA rendah ($<5^\circ$) atau terhalang kontur bumi, yang berpotensi meningkatkan risiko degradasi tautan komunikasi (*link degradation*). Demi keamanan, prosedur penerbangan dilengkapi mekanisme *Failsafe Return-to-Launch (RTL)* yang

terpicu otomatis apabila kualitas sinyal turun mendekati ambang batas sensitivitas minimum.

3 PEMBAHASAN

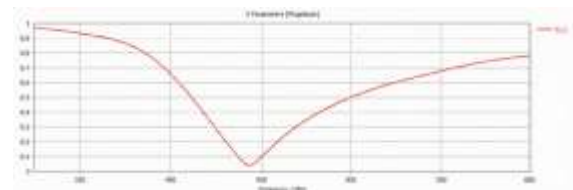
Bab ini menguraikan hasil evaluasi kinerja antenna Biquad yang dirancang untuk frekuensi 433 MHz. Analisis dilakukan secara komparatif meliputi hasil simulasi numerik CST Studio Suite, pengukuran karakteristik fisik menggunakan VNA, serta validasi integrasi pada system GCS untuk wahana *Hybrid VTOL*.

3.1 Karakterisasi Simulasi Numerik

Sebelum proses fabrikasi, desain antenna dimodelkan dan disimulasikan untuk memprediksi karakteristik elektromagnetik ideal. Simulasi difokuskan pada tiga parameter utama: *Return Loss* (S_{11}), *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), dan Pola Radiasi (*Radiation Pattern*).

3.1.1 Respon Frekuensi Simulasi

Hasil simulasi parameter S_{11} dan VSWR ditampilkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Berdasarkan hasil simulasi, antenna memiliki bandwidth kerja yang lebar dengan titik resonansi yang sedikit bergeser di atas frekuensi target. Meskipun demikian, pada frekuensi 433 MHz, nilai VSWR masih berada dalam rentang yang dapat diterima (≤ 1.5).



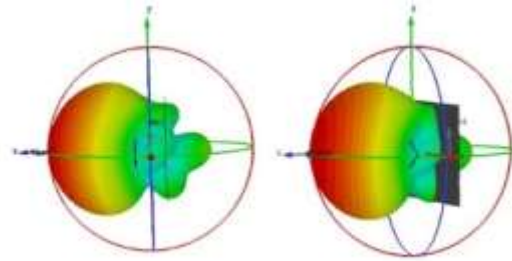
Gambar 7. Grafik parameter S_{11} hasil simulasi CST Studio Suite.



Gambar 8. Grafik nilai VSWR hasil simulasi CST Studio Suite.

3.1.2 Pola Radiasi dan Gain

Visualisasi pola radiasi 3D hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 9. Antenna memperlihatkan karakteristik *directional* (terarah) dengan *main lobe* yang kuat ke arah depan dan *back lobe* yang minim. Simulasi mencatatkan nilai *Gain* maksimum sebesar 10,49 dBi, yang mengindikasikan efisiensi tinggi dalam memusatkan energi RF untuk komunikasi jarak jauh.



Gambar 9. Pola radiasi 3D antenna hasil simulasi dengan CST Studio Suite

Tabel 2. Gain antenna hasil simulasi CST Studio Suite pada farfield ($f = 0.433$).

Type	Farfield
Approximation	Enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	433 MHz
Radiation Efficiency	-0.0004996 dB
Total Efficiency	-0.007926 dB
Directivity	10.49 dBi

Selain itu, efisiensi antenna dalam simulasi tercatat sangat tinggi. Efisiensi Radiasi (*Radiation Efficiency*) dan Efisiensi Total (*Total Efficiency*) masing-masing bernilai dikisaran -0.0005 dB dan -0.008 dB seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai efisiensi yang mendekati 0 dB (atau setara $\approx 99.8\%$) ini mengindikasikan bahwa pada kondisi simulasi ideal (menggunakan material *Perfect Electric Conductor*) dan hampir seluruh daya yang diinputkan berhasil dikonversi menjadi gelombang elektromagnetik tanpa kerugian panas (*ohmic losses*).

3.2 Realisasi Fabrikasi dan Pengukuran Laboratorium

Validasi fisik dilakukan menggunakan VNA Anritsu MS2034B. VNA Master untuk mengukur karakteristik antenna yang telah difabrikasi. Penggunaan alat ukur ini diperlukan untuk mendapatkan akurasi data pengukuran S_{11} dan impedansi.

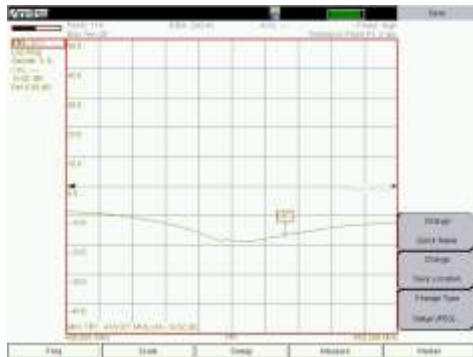
3.2.1 Analisis Pergeseran Frekuensi (Frequency Shift)

Hasil pengukuran fisik menunjukkan fenomena menarik di mana frekuensi resonansi mengalami pergeseran turun (*frequency down-shifting*) dibandingkan model simulasi. Sebagaimana terlihat pada data VNA di Gambar 10, antenna fisik mencapai resonansi optimum tepat pada frekuensi 433,027 MHz dengan nilai *Return Loss* sebesar -16,92 dB.

Pergeseran frekuensi dari ≈ 442 MHz (simulasi) menjadi 433 MHz (pengukuran) ini terjadi akibat efek pembebanan dielektrik (*dielectric loading effect*). Material penyangga, timah solder pada *feedpoint*, dan selubung dielektrik pada konektor SMA memberikan kapasitansi parasitik tambahan yang tidak dimodelkan sempurna dalam simulasi. Fenomena ini justru memberikan keuntungan teknis karena menempatkan

titik kerja antenna tepat pada frekuensi telemetri yang diinginkan tanpa perlu *tuning* ulang.

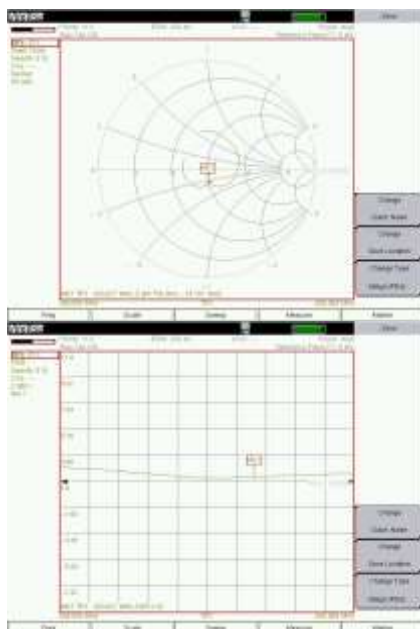
Selain parameter return loss dan VSWR, hasil pengukuran menunjukkan bahwa antenna memiliki bandwidth sekitar ± 12 MHz pada batas VSWR $\leq 1,5$ di sekitar frekuensi 433 MHz. Bandwidth ini menunjukkan toleransi frekuensi yang cukup terhadap variasi lingkungan dan potensi pergeseran frekuensi akibat toleransi fabrikasi maupun pemanasan rangkaian telemetri, sehingga mendukung kestabilan operasi sistem komunikasi.



Gambar 10. Hasil pengukuran VNA resonansi di 433 MHz

3.2.2 Analisis Impedansi dan VSWR Aktual

Parameter VSWR hasil pengukuran ditampilkan pada Gambar 11. Nilai VSWR terukur pada frekuensi kerja adalah 1.33. Angka ini jauh lebih baik dari batas toleransi standar VSWR ≤ 2 dan memenuhi target desain VSWR $\leq 1,5$. Serta bandwidth ± 12 MHz pada batas VSWR $\leq 1,5$. Selain itu, impedansi input terukur sebesar $48,7\Omega$, yang sangat mendekati impedansi karakteristik sistem 50Ω . Hal ini mengindikasikan bahwa *matching impedance* antenna sangat baik, sehingga meminimalisir daya pantul (*reflected power*) kembali ke transmitter.



Gambar 11. Grafik pengukuran VSWR Smith Chart (Atas) dan Linear (Bawah)

3.3 Hasil Pengujian Lapangan

Setelah lolos uji karakteristik RF, antenna diintegrasikan ke dalam sistem komunikasi misi. Sistem ini dirancang untuk mendukung wahana udara nirawak (UAV) tipe Hybrid VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*). Validasi akhir dilakukan melalui uji terbang (*flight test*) menggunakan misi *waypoint* otonom. Jalur penerbangan dirancang bergerak lurus menjauhi GCS melintasi area dengan hambatan vegetasi parsial untuk menguji ketangguhan sinyal, seperti divisualisasikan pada peta satelit di Gambar 12.



Gambar 12. Visualisasi jalur penerbangan misi *waypoint* otonom pada GCS PIGEON untuk pengujian jangkauan maksimum.

3.4 Analisis Stabilitas Sinyal terhadap Jarak

Data telemetri diekstraksi untuk memetakan hubungan antara jarak tempuh (*Distance*) dengan kualitas sinyal (*Link Quality*). Penurunan kualitas sinyal yang terjadi seiring bertambahnya jarak sejalan dengan karakteristik propagasi komunikasi UAV yang dipengaruhi oleh *path loss*, vegetasi, dan *multipath fading* (Pradinawan et al., 2026).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa antenna mampu mempertahankan konektivitas stabil hingga jarak uji maksimum 2,2 km. Pada jarak 0 hingga 1,5 km, sinyal sangat stabil di atas 80%. Penurunan sinyal mulai terjadi secara gradual di atas 1,5 km akibat efek *free-space path loss* dan *multipath* vegetasi, namun kualitas sinyal tetap terjaga di atas ambang batas aman (20-30%) hingga akhir misi. Capaian ini memvalidasi bahwa *Gain* tinggi hasil simulasi (10,49 dBi) terbukti efektif meningkatkan *link budget* sistem komunikasi jarak jauh.

Dibandingkan dengan antenna monopole standar yang hanya mampu mempertahankan konektivitas stabil hingga $\pm 1,2$ km, sistem yang diusulkan mampu memperpanjang jangkauan komunikasi hingga 2,2 km. Hal ini menunjukkan peningkatan jarak efektif sekitar 1 km atau setara dengan peningkatan sekitar 83% dibandingkan antenna monopole. Secara kuantitatif, peningkatan ini mengindikasikan perbaikan signifikan pada link budget sistem telemetri akibat penggunaan antenna Biquad dengan gain lebih tinggi dan pola radiasi terarah.

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat tren penurunan kualitas sinyal yang linear seiring bertambahnya jarak. Sampel data telemetri yang merepresentasikan degradasi sinyal pada berbagai titik jarak uji ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sampel Log Data Telemetry Uji Terbang dan Azimuth Antenna Tracker

Altitude (m)	Distance (m)	Azimuth Tracker (°)
30	12.7	193
60	235.8	198
60	494.2	202
60	783.5	206
60	1014.7	209
60	1299	210
100	1550.6	213
100	1720.4	213
100	1858.6	214
100	2050.5	218
100	2209.9	223

Data pada Tabel 4 merupakan kelanjutan dari log penerbangan yang sama seperti pada Tabel 3, sehingga setiap baris merepresentasikan titik pengukuran yang identik.

Tabel 4. Sampel Log Data Telemetry Uji Terbang dan Signal Strength (%)

Altitude (m)	Signal Strength (%)	Status
30	99%	Take-off / Close Range
60	85%	Stable / LOS
60	69%	Stable
60	58%	Stable
60	49%	Vegetation
60	37%	Fluctuation
100	30%	Multipath Fading Long Range
100	29%	Long Range
100	27%	Critical Limit
100	24%	Critical Limit
100	RTL*	Max Range Reached

Data pada Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan fenomena propagasi yang terjadi selama pengujian. Berdasarkan kedua tabel tersebut, peningkatan sudut azimuth *antenna tracker* berlangsung konsisten terhadap penambahan jarak UAV, yang menunjukkan bahwa sistem *tracking* bekerja sinkron dengan perubahan posisi UAV. Pada fase awal (*Close Range* hingga *Stable/LOS*), penurunan sinyal mengikuti tren path loss yang wajar terhadap penambahan jarak. Memasuki jarak sekitar 1 km, mulai teramati pengaruh vegetasi dan *multipath fading* yang menyebabkan fluktuasi kualitas sinyal akibat difraksi, pantulan, dan serapan gelombang. Meskipun terjadi penurunan bertahap, konektivitas tetap terjaga hingga fase *Long Range* dan *Critical Limit*, menunjukkan bahwa gain antena mampu mengkompensasi kerugian daya propagasi. Pengujian berakhir pada status RTL pada jarak 2,2 km, yang menandakan batas sensitivitas penerima.

Fluktuasi *Link Quality* tidak semata dipengaruhi oleh jarak, tetapi juga oleh dinamika penerbangan. *Manuver bank turn* dapat mengubah orientasi dan

polarisasi relatif antena, sementara sudut elevasi rendah (<5°) meningkatkan potensi redaman tambahan. Temuan ini menegaskan bahwa performa sistem dipengaruhi oleh kondisi propagasi dinamis pada skenario *real-flight*, bukan hanya parameter antena secara statis.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengintegrasikan antena Biquad 433 MHz dengan sistem antenna tracker berbasis GPS untuk meningkatkan performa komunikasi UAV Hybrid VTOL. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memperpanjang jangkauan komunikasi stabil hingga 2,2 km, meningkat sekitar 83% dibandingkan antena monopole standar. Integrasi antena terarah dan mekanisme tracking terbukti meningkatkan reliabilitas tautan dengan menjaga alignment pola radiasi selama penerbangan dinamis. Meskipun demikian, performa sistem masih dipengaruhi oleh kondisi propagasi seperti multipath fading, sudut elevasi rendah, dan manuver UAV. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada pengembangan algoritma filtering GPS yang lebih adaptif serta peningkatan presisi sistem mekanik untuk mendukung manuver yang lebih agresif dan jarak operasi yang lebih jauh.

PUSTAKA

- Al-S'adi, A. S. & Al-Hameed, A. S., 2024. Security Analysis and Enhancements of MAVLink Protocol in Fixed-Wing and VTOL UAVs. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*. <https://doi.org/10.1108/IJIUS-2024-0012>
- Alam, M. M. & Moh, S., 2024. Beam Alignment Techniques for UAV-Enabled Wireless Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 26(1), pp. 148–167. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3322456>
- Bai, Y., Zhang, J. & Liu, H., 2024. Movable Antenna-Equipped UAV for Data Collection in Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Letters*, 28(3), pp. 561–565. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3341231>
- Balanis, C. A., 2016. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118642061>
- Beard, R. W. & McLain, T. W., 2012. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Bustomi, M. A. & Pramono, Y. H., 2023. Use of Bi-Polygonal Antenna Model to Explain Antenna Work Frequency Shifts in Microstrip Designs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2392(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2392/1/012032>
- Coyago, J., González, E., Morales, F., Coral, R. (2023). Implementation of a 2.4 GHz Biquad Antenna for a Microwave and Antenna Laboratory. In: Rocha, Á., Ferrás, C., Ibarra, W. (eds) *Information Technology and Systems. ICITS 2023. Lecture Notes in Networks and*

- Systems, vol 691. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33258-6_6
- Coyago, J., Piloso, L. & Pila-Flores, J. L., 2023. Implementation of a 2.4 GHz Biquad Antenna for Wireless Communication Systems. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 18(3).
- Davis, J. R., ed., 2001. *Copper and Copper Alloys*. Materials Park, OH: ASM International.
- Grewal, M. S., Weill, L. R. & Andrews, A. P., 2013. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/9780470053490>
- Haq, M. A. & Kurniawan, F., 2022. Optimization of Biquad Antenna Design for 433 MHz Telemetry Systems in Long-Range UAV Applications. *Journal of Applied Electrical Engineering*, 4(1), pp. 15–22. <https://journal.unesa.ac.id/index.php/jaee>
- Hashim, H. A., 2025. Advances in UAV Avionics Systems and Communication Technologies. *Journal of Aerospace Systems*, 8(2), pp. 95–108.
- Hou, A. S. & Lin, C. E., 2022. UAS Delivery Multi-Rotor Autopilot Based on ArduPilot Framework for Long-Range Logistics. *Aerospace*, 9(4), p. 191. <https://doi.org/10.3390/aerospace9040191>
- Kelechi, A. H., Okoro, O. I. & Nwankwo, U. C., 2021. Recent Advancements in UAV Communication and Antenna Tracking Systems. *Sensors*, 21(16), p. 5342. <https://doi.org/10.3390/s21165342>
- Mahbub, M., Islam, S. & Rahman, M., 2025. A Holistic Survey of UAV-Assisted Wireless Communications. *Journal of Network and Computer Applications*, 222, p. 103672. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103672>
- Melvi, Melvi, et al. "Analisis Rancangan Antena Telemetri Jenis Dipole Pada Unmanned Aerial Vehicle (UAV)." *Jurnal Teknologi Riset Terapan*, vol. 1, no. 2, Jul. 2023, pp. 81-89, doi:[10.35912/jatra.v1i2.2404](https://doi.org/10.35912/jatra.v1i2.2404).
- Munziah, S., Muhammadi, I., & Praja, M. (2024). Analisis Pola Radiasi dan Gain pada Antena Cassegrain dengan Frekuensi C-Band. *Journal of Telecommunication Electronics and Control Engineering (JTECE)*, 6(2), 152-162. <https://doi.org/10.20895/jtece.v6i2.1212>
- T. L. T. Thi, T. T. Nguyen, C. P. Dang and T. M. Nguyen, "A Modified C-Band Double Biquad Antenna for Airborne UAV Applications," 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), Firenze, Italy, 2024, pp. 2575-2576, doi: [10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10685937](https://doi.org/10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10685937).
- Pradinawan, A. P., Santoso, I. & Nugroho, B., 2026. Peningkatan Jangkauan Telemetry UAV Menggunakan Antena Yagi 433 MHz dengan Pelacak Otomatis Berbasis GPS. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 14(1).
- Trinh, M. L., Nguyen, T. H. & Le, D. T., 2025. UAV Networking Algorithms and Communication Architectures: A Review. *Algorithms*, 18(5), p. 244. <https://doi.org/10.3390/a18050244>
- Tyrovolas, D., Kountouris, M. & Gesbert, D., 2021. Synergetic UAV Communication with Directional Antenna Transmission. *IEEE Transactions on Communications*, 69(7), pp. 4657–4670. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3065429>
- Wardihani, E. D., Prasetyo, A. & Nugraha, F., 2023. Analysis of Propagation Characteristics in UAV Communication Systems. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 13(4), pp. 1450–1457.
- Widianto, A., et al., 2023. Design and Implementation of Biquad Antenna for Long-Range UAV Telemetry at 433 MHz Frequency. *Journal of Telecommunication and Network Engineering*. <https://scholar.google.com/scholar?q=Design+and+Implementation+of+Biquad+Antenna+for+Long-Range+UAV+Telemetry>
- Wijanarko, H., Bramantyo, D, L., Kamarudin, Aisyah, S., 2022, "Rancang Bangun Antena Double Biquad Pada Sistem Ground Segment Menggunakan Frekuensi 433 MHz", *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro (JETri)*, Vol. 19, No. 2. <https://doi.org/10.25105/jetri.v19i2.6081>
- Xiao, Z., Xia, P. & Xia, X., 2021. Beamforming-Enabled UAV Communications: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1), pp. 280–306. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3041962>

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN