

PENINGKATAN JANGKAUAN TELEMETRY UAV MENGGUNAKAN ANTENA YAGI 433 MHz DILENGKAPI PELACAK OTOMATIS BERBASIS GPS

Aditya Putra Pradinawan^{1*}, Eni Dwi Wardihani¹, Eddy Triyono¹, Magfur Ramdhani¹

¹Politeknik Negeri Semarang; Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275; (024) 7473417

Keywords:

Yagi Antenna;
MWSN;
Telemetry;
Mission Planner;
UAV;

Correspondent Email:

aditya.putra@polines.ac.id

Abstrak. Penelitian ini membahas perancangan, pengembangan, dan evaluasi sistem antena directional Yagi yang terintegrasi dengan pelacak otomatis berbasis GPS untuk meningkatkan jangkauan komunikasi pada Mobile Wireless Sensor Networks (MWSN) berbasis Unmanned Aerial Vehicle (UAV) pada frekuensi 433 MHz. Antena Yagi-Uda 8 elemen dirancang menggunakan perangkat lunak YagiCAD dan dibuat dari pipa aluminium berdiameter 0,89 cm, menghasilkan gain sebesar 13,75 dBi. Sistem ini diuji melalui simulasi dan pengujian langsung di lapangan dengan pengukuran VSWR, RSSI, dan RSL. VSWR awal perancangan adalah 1,5 dan berhasil diturunkan menjadi 1,05 setelah penyempurnaan struktural. Hasil pengujian lapangan menunjukkan jangkauan maksimum sebesar 96,43 meter dengan daya pancar hanya 1 dBm, serta kestabilan sinyal yang lebih baik dibandingkan konfigurasi antena omnidireksional. Dibandingkan antena bawaan, sistem ini meningkatkan jangkauan hingga lima kali lipat dan tetap bekerja andal pada daya sangat rendah, meskipun kemampuan perangkat telemetry dapat memancarkan hingga 20 dBm. Penelitian ini menawarkan solusi untuk peningkatan performa telemetry UAV serta memiliki potensi aplikasi di jaringan LPWAN, pemantauan lingkungan terpencil, dan integrasi sistem IoT.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. This research discusses the design, development, and evaluation of a directional Yagi antenna system integrated with a GPS-based automatic tracker to enhance communication range in Mobile Wireless Sensor Networks (MWSN) based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) at the 433 MHz frequency. The 8-element Yagi-Uda antenna was designed using the YagiCAD software and constructed from aluminum pipes with a diameter of 0.89 cm, yielding a gain of 13.75 dBi. The system was tested through simulation and direct field trials, involving measurements of Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), Received Signal Strength Indicator (RSSI), and Received Signal Level (RSL). The initial VSWR of 1.5 was successfully reduced to 1.05 after structural refinement. The test results showed a maximum range of 96.43 meters with a transmit power of only 1 dBm, along with better signal stability compared to the omnidirectional antenna configuration. Compared to the stock (built-in) antenna, this system increases the range up to fivefold and remains reliable even at very low power, however the telemetry device's capability to transmit up to 20 dBm. This research offers solution for improving UAV telemetry performance and has potential applications in Low-Power Wide-Area Network (LPWAN), remote environmental monitoring, and Internet of Things (IoT) system integration.

1. PENDAHULUAN

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) telah menjadi perangkat yang sangat penting dalam berbagai bidang seperti pemantauan lingkungan, deteksi kebakaran hutan [1], inspeksi infrastruktur, dan tanggap darurat di wilayah terpencil. Salah satu komponen krusial dalam misi berbasis UAV adalah link komunikasi antara UAV dan *Ground Control Station* (GCS), yang memungkinkan transmisi data telemetri, perintah navigasi, dan umpan balik sensor secara real-time [2]. Keandalan dan kestabilan link telemetri sangat penting untuk keselamatan misi, khususnya dalam operasi jarak jauh atau pada kondisi medan yang kompleks [3], [4].

Secara umum, sistem telemetri UAV komersial maupun hobi masih menggunakan antena omnidireksional pada UAV dan GCS. Meskipun antena ini memancarkan sinyal secara merata ke segala arah, namun kinerjanya sangat terbatas dalam hal jangkauan dan kualitas sinyal, terutama di lingkungan seperti hutan atau daerah perbukitan yang memiliki hambatan fisik dan efek multipath yang tinggi [5]. Keterbatasan ini menyebabkan penurunan kekuatan sinyal, peningkatan paket data yang hilang, hingga putusnya komunikasi secara total, yang dapat menggagalkan misi yang telah direncanakan pada GCS [6].

Penelitian oleh Juma et al. [7] menunjukkan bahwa jarak maksimum yang dicapai oleh sistem 3DR telemetry dengan antena tracker otomatis berbasis GPS hanya mencapai 140 meter. Jarak ini masih terlalu pendek untuk misi pemantauan titik api menggunakan UAV di kawasan hutan, yang menuntut cakupan komunikasi lebih luas. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini mengusulkan penggantian antena bawaan 3DR pada sisi penerima (Rx) atau GCS dengan antena directional Yagi-Uda, yang memiliki gain lebih tinggi dan pola radiasi yang lebih fokus. Antena tersebut dikombinasikan dengan pelacak otomatis berbasis GPS untuk mengikuti pergerakan UAV secara dinamis. Dengan konfigurasi ini, diharapkan jarak cakupan dapat ditingkatkan secara signifikan, sehingga semua data penerbangan dan informasi dari Mobile Wireless Sensor Network (MWSN) [8], [9] dapat dikirimkan secara *realtime* dan akurat ke

GCS. UAV yang digunakan dalam penelitian ini adalah *quadcopter* [10], yang memiliki kestabilan tinggi untuk uji coba diam maupun gerak.

Antena directional seperti Yagi-Uda memberikan pola radiasi yang lebih terarah dengan gain lebih tinggi, kekuatan sinyal yang lebih baik, serta pengurangan interferensi dari arah yang tidak diinginkan. Namun, kelemahan utama dari penggunaan antena directional adalah perlunya penyelarasan terus-menerus dengan posisi UAV yang bergerak. Tanpa penyelarasan tersebut, antena ini tidak dapat mengarah langsung ke UAV, sehingga dalam menyebabkan hilang kendali terhadap UAV [11], [12].

Untuk mengatasi hal ini, telah dikembangkan sistem pelacak antena otomatis, yang secara dinamis menyelaraskan arah antena pada GCS berdasarkan data posisi ketinggian, latitude dan longitude secara *realtime* dari GPS. Sistem ini umumnya bekerja dalam dua sumbu (azimuth dan elevasi), dikendalikan oleh servo motor melalui software seperti Mission Planner [11], [13].

Berbagai studi sebelumnya telah membuktikan keunggulan penggunaan antena directional dalam komunikasi UAV. Melvi [14] mensimulasikan dan merealisasikan antena Yagi dengan 7 elemen yang menghasilkan gain teoritis sebesar 10,7 dBi, dan mampu digunakan di lapangan hingga 2,5 km. Sementara itu, Khoerunnisa et al. [11] mengkaji penggunaan antena Yagi pada sistem radiosonde dan mendapatkan hasil yang baik dalam aplikasi telemetry statis.

Namun, studi-studi tersebut memiliki beberapa keterbatasan, antara lain:

- Umumnya menggunakan daya pancar tinggi (>10 dBm);
- Pengujian lapangan dilakukan dalam kondisi statis atau semi-statis, sehingga belum mewakili dinamika pelacakan *real-time*;
- Desain antena yang digunakan relatif sederhana, dengan optimalisasi VSWR dan gain yang terbatas.
- Di sisi lain, teknologi beamforming dan sistem tersebut menawarkan solusi

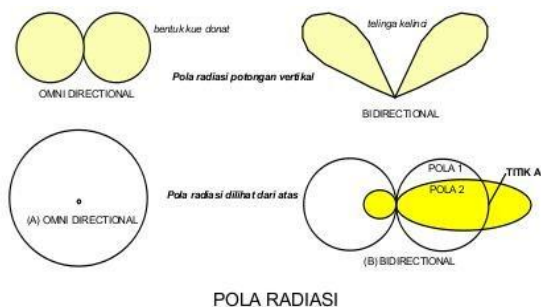
canggih, tetapi harganya mahal, kompleks, dan kurang praktis untuk aplikasi telemetri jarak menengah pada UAV berukuran kecil [15].

Penelitian ini berupaya mengatasi keterbatasan tersebut dengan merancang dan membangun, sistem antena Yagi-Uda directional yang terintegrasi dengan pelacak otomatis berbasis GPS. Sistem ini dioptimalkan untuk bekerja pada frekuensi 433 MHz, yang umum digunakan dalam sistem telemetri UAV, dan diuji menggunakan daya pancar paling rendah (1 dBm) untuk menunjukkan efisiensi serta keandalan sistem yang dirancang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. ANTENA YAGI

Antena yagi adalah pemilihan yang tepat jika akan digunakan untuk komunikasi data dengan *coverage* yang jauh karena merupakan antena direksional [16]. Jarak pancaran antena yagi dapat sangat jauh tergantung dari perancangan antena, dan kebutuhannya. Namun ada kekurangan dari antena yagi yaitu *beamwidth* (sudut pancaran) yang sempit. Jika akan diterapkan untuk komunikasi pada antena yang bergerak membutuhkan sistem tambahan yaitu pengarah antena (*antenna tracker*). Kelemahan lain antena yagi adalah bentuk fisiknya yang besar jika frekuensi kerjanya kecil. Gambar 1 merupakan ilustrasi gambar perbedaan pola radiasi antena *omnidirectional* dengan *directional*.



Gambar 1. Pola Radiasi

Berikut ini adalah rumus penentuan panjang elemen driven dipole pada antena yagi [17] :

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

dengan

λ = Panjang gelombang (m)
 c = Kecepatan cahaya (3.108 m/s)
 f = Frekuensi (MHz)

dari rumus tersebut maka diperoleh nilai untuk $\frac{1}{2} \lambda$ adalah

$$\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c}{f} \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{3 \times 108}{f} = \frac{150}{f} \text{ meter} \quad (2)$$

Dalam perancangan antena yagi jumlah elemen dan jarak antar elemen juga akan berpengaruh dengan penguatan (*gain*) dari antena [18]. Untuk elemen *reflector* ditempatkan di belakang dipole yang didorong (utama) dan dibuat kira – kira 5% lebih panjang dari dipole yang didorong, sehingga menjadi induktif. Untuk elemen pengarah (*director*) yang ditempatkan di depan dipole utama kira – kira 5% lebih pendek daripada dipole itu sendiri sehingga bersifat kapasitif. Untuk jarak optimum antar elemen kira – kira $0,15 \lambda$ [17].

Namun dalam perhitungan antena ini ada faktor koreksi yang dinamakan dengan faktor K sehingga panjang fisik antena menjadi [17]:

$$l = \left(\frac{150K}{f} \right) \text{ meter} \quad (3)$$

atau

$$l = \left(\frac{492K}{f} \right) \text{ feet} \quad (4)$$

dengan,

$K = \frac{1}{2} \lambda_0 / D$

D = diameter batang konduktor (cm)

Perhitungan lain yang harus diperhatikan adalah perhitungan Z (impedansi) terhadap jarak antar konduktor direktivitas, dirumuskan sebagai berikut [17]:

$$Z = 276 \log \left(\frac{2s}{d} \right) \quad (5)$$

dengan,

Z = impedansi karakteristik (Ω)

s = panjang jarak antar konduktor (meter)

d = diameter konduktor (meter)

Antena direksional dikatakan mempunyai gain yang dinyatakan dalam dB. Gain adalah perbandingan logaritmik antara power antena dibandingkan dengan dipole $\frac{1}{2} \lambda$. Apabila sebagai pembanding digunakan antena

isotropic, maka gain dinyatakan dalam dBi.. Pada umumnya gain suatu antenna yang digunakan pembanding adalah dipole $\frac{1}{2} \lambda$. Rumus perhitungan gain antenna berdasarkan pengukuran adalah sebagai berikut [19] :

$$Gain = \left(\left(\frac{d_{\text{antena}}}{d_{\text{pembanding}}} \right) \times G_p \right) dB \quad (6)$$

2.2. PELACAK ANTENA (ANTENNA TRACKER)

Antenna tracker adalah sebuah perangkat tracking yang digunakan untuk mengikuti arah antenna yang bergerak, atau sering disebut dengan rotator. Fungsi dari antenna tracker sangat penting dalam komunikasi jarak jauh yang menggunakan antenna ber-beamwidth kecil seperti antenna yagi. Antenna tracker dapat mengikuti arah antenna yang bergerak berdasarkan posisi dari GPS yang diterima oleh software Mission Planner. Data tersebut dikirimkan ke otak penggerak dari tracker tersebut. Tracker ini dimaksudkan juga untuk mengarahkan antenna direksional tepat ke mobile antenna sehingga dapat menangkap sinyal seoptimal mungkin. Untuk mengatur posisi agar sesuai dengan arah antenna yang dituju maka dapat diperhatikan sudut azimuth, elevasi dan deklinasinya[12].

2.3. RSSI DAN RSL

Dalam telekomunikasi, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) adalah pengukuran besaran power sinyal radio yang diterima. RSSI dapat terlihat user dari perangkat penerima. (RSL) adalah level sinyal yang diterima di penerima dan nilainya harus lebih besar dari sensitivitas perangkat penerima ($RSL \geq R_{th}$). Sensitivitas perangkat penerima merupakan kepekaan suatu perangkat pada sisi penerima yang dijadikan ukuran threshold. Ketika sinyal RSL tidak memenuhi threshold sebuah perangkat penerima maka akan terjadi *loss*. Akibat dari *loss* yaitu kedua perangkat tidak dapat berkomunikasi satu sama lain.. Nilai RSL dapat dihitung dengan persamaan berikut[20]:

$$RSL = EIRP - L_{prop} + G_{RX} - L_{RX} \quad (7)$$

dengan,

EIRP = *Effective Isotropic Radiated Power* (dBm)

L_{prop} = rugi-rugi saat propagasi (dB)

G_{RX} = penguatan antenna penerima (dB)

L_{RX} = rugi-rugi saluran penerima (dB)

EIRP merupakan besaran yang menyatakan kekuatan daya pancar suatu antenna di bumi, rumus dari EIRP adalah sebagai berikut[20]:

$$EIRP = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} \quad (8)$$

dengan,

P_{TX} = daya pancar (dBm)

G_{TX} = penguatan antenna pemancar (dB)

L_{TX} = rugi-rugi pada pemancar (dB)

Dikarenakan penerimaan sinyal dalam software Mission Planner adalah RSSI maka dapat dikonversikan hasil dari RSSI menjadi RSL dengan rumus sebagai berikut[20]:

$$\text{signal_dBm} = \left(\frac{\text{RSSI}}{1.9} \right) - 127 \quad (9)$$

L_{prop} pada rumus (7) dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini {Citation}:

$$L_p = 32,45 + 20 \log f + 20 \log d \quad (10)$$

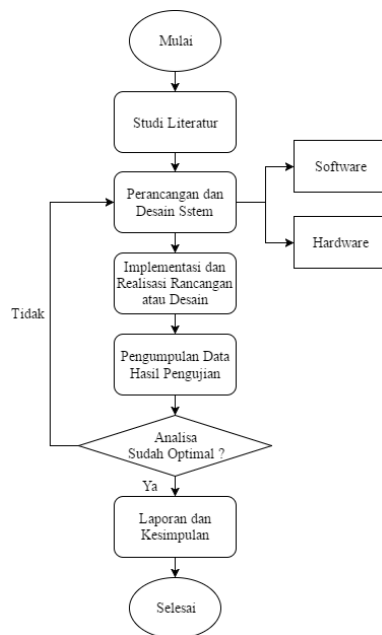
dengan,

f = frekuensi operasi (MHz)

d = jarak antara pengirim dan penerima (km)

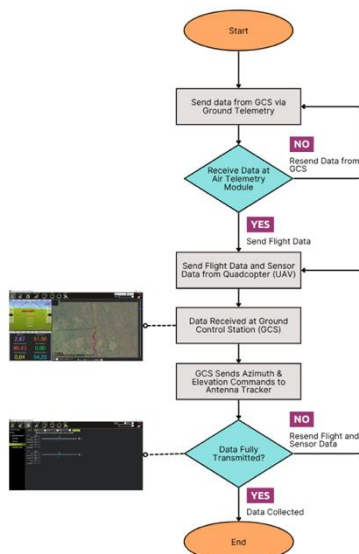
3. METODE PENELITIAN

Secara umum, metode penelitian ini mengikuti pendekatan terstruktur, dimulai dari tahap perancangan sistem, implementasi, konfigurasi, pengujian, hingga analisis data. Seluruh alur kerja sistem digambarkan untuk menunjukkan urutan perancangan antenna, pembangunan pelacak, integrasi sistem, serta pengujian performa, lihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan kerangka sistem komunikasi untuk telemetri UAV berbasis antenna *directional* dan pelacak antenna otomatis (*automatic antenna tracker*). Sistem ini dirancang untuk memastikan transmisi data yang andal antara *quadcopter* dan GCS melalui jalur komunikasi frekuensi 433 MHz dengan dukungan pelacak berbasis GPS. Proses telemetri terdiri dari beberapa tahap, termasuk pertukaran data antara modul udara dan darat, akuisisi data penerbangan, serta kontrol pelacakan dinamis.



Gambar 2. Diagram Alir Proses Komunikasi Telemetri

Gambar 2 menunjukkan alur lengkap dari proses komunikasi telemetri yang diterapkan dalam penelitian ini.

3.1. PERANCANGAN ANTENA YAGI

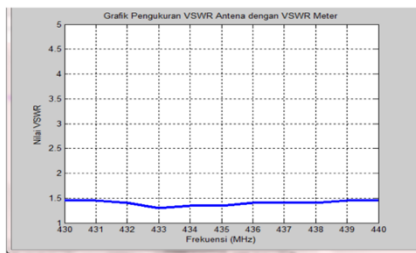
Antena Yagi dirancang untuk bekerja pada frekuensi tengah 433 MHz dengan pendekatan panjang gelombang setengah ($\frac{1}{2} \lambda$). Antena terdiri dari 8 elemen: satu *reflector*, satu elemen pemancar (*driven*), dan enam *director*. Konstruksi antena menggunakan pipa aluminium berdiameter 0,89 cm dan boom aluminium persegi berukuran 2 cm × 2 cm. Desain awal dihitung secara manual dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak YagiCAD untuk mengoptimalkan nilai VSWR dan gain.

Gambar 3. Antena Yagi $\frac{1}{2} \lambda$ 8 Elemen

Saluran transmisi menggunakan kabel koaksial RG-58 dengan impedansi 50 Ω . Sebuah kapasitor sebagai *matching* impedansi dipasang pada elemen *driven* untuk memastikan *matching* yang sesuai. Antena hasil fabrikasi kemudian diuji menggunakan VSWR meter dan dikalibrasi hingga diperoleh nilai VSWR akhir sebesar 1,05.



Gambar 4. Simulasi VSWR Menggunakan YagiCAD



Gambar 5. Grafik Pengukuran VSWR pada antenna rancangan VSWR Meter



Gambar 6. Perbandingan Konfigurasi Antena Sebelum dan Sesudah Penyempurnaan Jarak Elemen Driven dan Matching



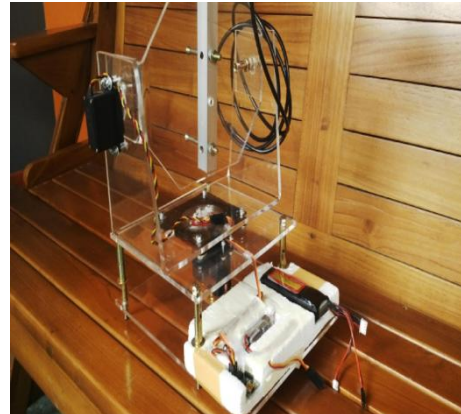
Gambar 7. Perbandingan Grafik VSWR Sebelum dan Sesudah Penyempurnaan Jarak Elemen Driven dan Matching

3.2. PERANCANGAN ANTENNA TRACKER

Antenna Tracker dibuat dari akrilik setebal 5 mm. Struktur sumbu pan (*azimuth*) terdiri dari dua bidang persegi 20×20 cm, dan lengan tilt (*elevasi*) berukuran 20×15 cm. Bearing Lazy Susan digunakan untuk mendukung pergerakan dua sumbu. Sistem pelacakan digerakkan oleh dua servo: Hitec HS-785HB untuk sumbu pan (torsi: 11 kg.cm) dan HS-645MG untuk sumbu tilt (torsi: 7,7 kg.cm).

Control logic menggunakan Pololu Maestro Servo Controller, dikonfigurasi melalui perangkat lunak Maestro Control Center.

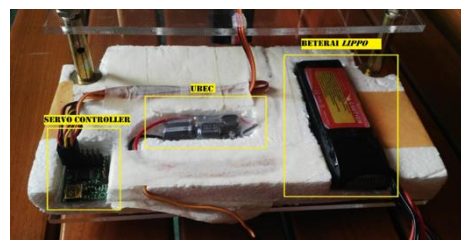
Pengaturan sinyal PWM, titik tengah, kecepatan, dan akselerasi servo dimasukkan dan diunggah ke mikrokontroler. Daya menggunakan baterai LiPo 3S (12,6 V, 2200 mAh), yang dikonversi menjadi 5V atau 6V menggunakan modul BEC.



Gambar 8. Implementasi Rancangan Sistem Antenna Tracker

3.3. INTEGRASI SISTEM

Antena Yagi dan pelacak dipasang menjadi satu unit. Servo controller, BEC, dan baterai diletakkan pada bagian bawah *antenna tracker*. Pin 1 Maestro dihubungkan ke servo pan, dan Pin 2 ke servo tilt. Sistem dikoneksikan ke Mission Planner melalui USB, dengan pengaturan port COM dan *baudrate* yang sesuai.



Gambar 9. Konfigurasi Sistem Pelacak Antena

Pada Mission Planner, modul *antenna tracker* diaktifkan melalui Initial Setup > Optional Hardware. Nilai PWM dan titik tengah servo dimasukkan berdasarkan data pada datasheet. Lokasi home untuk UAV dan tracker ditentukan melalui tab *Flight Plan*. Setelah terhubung, sistem diuji untuk memastikan *antenna tracker* mengikuti pergerakan UAV berdasarkan koordinat GPS.



Gambar 10. Konfigurasi Sinyal PWM pada Mission Planner

3.4. PENGUJIAN DAN PENGUMPULAN DATA

Pengujian mencakup pengukuran VSWR, gain, serta RSSI dan RSL. VSWR diukur menggunakan alat VSWR meter setelah dilakukan kalibrasi (lihat pada Gambar 11) dan pengaturan frekuensi. Pemancar yang digunakan adalah HT Baofeng dengan daya 5W. Pengukuran gain dilakukan dengan membandingkan kekuatan sinyal terhadap antenna referensi.



Gambar 11. Kalibrasi VSWR Meter

Data RSSI dikumpulkan dari log penerbangan di Mission Planner selama penerbangan quadcopter (lihat pada Gambar 12). Nilai RSSI kemudian dikonversi menjadi RSL (*Received Signal Level*) menggunakan rumus regresi. Semua data teoritis dan hasil pengukuran dicatat dalam tabel dan divisualisasikan dalam bentuk grafik.



Gambar 12. Data RSSI yang Dikumpulkan dari Mission Planner

Received Signal Level (RSL) mengacu pada daya aktual sinyal yang diterima pada input perangkat penerima. Untuk menjamin komunikasi yang andal, nilai RSL harus sama dengan atau lebih besar dari ambang sensitivitas penerima (R_{th}); jika tidak, maka koneksi komunikasi akan gagal akibat lemahnya penerimaan sinyal[21], [22].

Nilai RSL dihitung menggunakan persamaan yang telah dituangkan dalam tinjauan Pustaka menggunakan persamaan rumus (7-10).

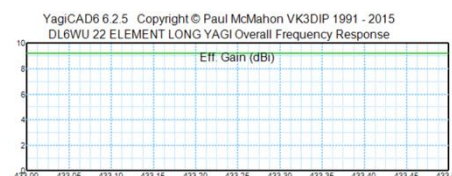
3.5. ANALISIS DATA

Analisis difokuskan pada hubungan antara VSWR, gain, jarak, dan RSL. Grafik dan tabel dibuat untuk memvisualisasikan pengaruh desain antenna dan jarak antar elemen terhadap performa sistem. Analisis regresi digunakan untuk memodelkan perilaku RSL terhadap jarak dan menguji efektivitas antenna directional. Jika hasil belum sesuai, sistem diperbaiki dan diuji kembali hingga sesuai dengan target desain.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

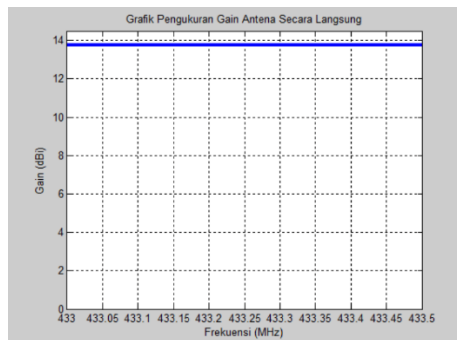
4.1. DATA PENGUKURAN GAIN ANTENA

Hasil pengukuran gain yang diperoleh melalui simulasi menggunakan YagiCAD6 ditunjukkan pada Gambar 13.

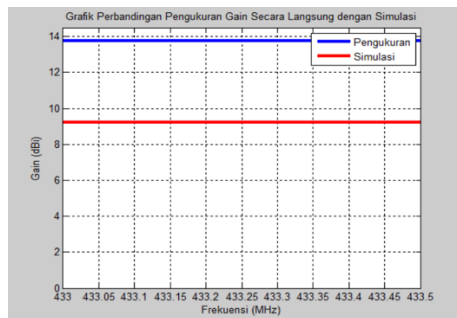


Gambar 13. Grafik Gain Efektif dari Simulasi

Grafik gain antenna yang diukur secara langsung ditampilkan pada Gambar 14. Dalam pengukuran ini, dilakukan uji lapangan secara langsung, dan gain ditentukan menggunakan metode antenna referensi sebagai acuan pembanding. Daya pancar (Tx) yang digunakan selama pengujian adalah 1 dBm, dan gain antenna referensi adalah 2,5 dBi. Perbandingan antara data simulasi dan data hasil pengukuran langsung ditunjukkan pada Gambar 15.



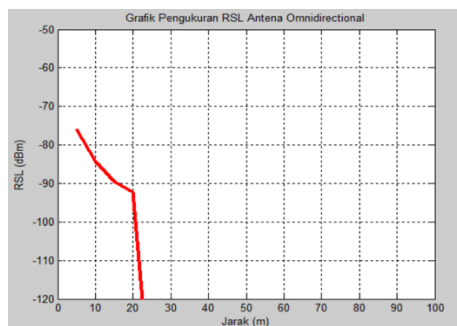
Gambar 14. Pengukuran Langsung Gain Antena



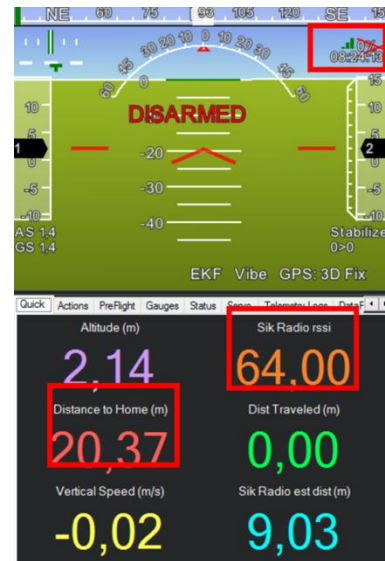
Gambar 15. Grafik Perbandingan Pengukuran Gain

4.2. DATA PENGUKURAN RSL

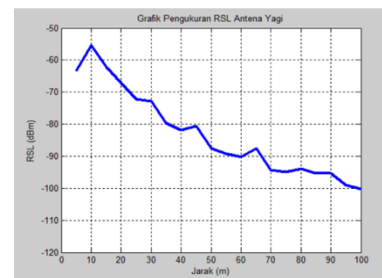
Data pengukuran RSL diperoleh melalui perhitungan berdasarkan Persamaan (7). Awalnya, data dicatat dalam bentuk nilai RSSI yang diukur menggunakan perangkat lunak Mission Planner. Nilai RSSI ini kemudian dikonversi menjadi nilai RSL menggunakan persamaan yang sesuai untuk menentukan apakah tingkat sinyal yang diterima melampaui nilai ambang batas RSL dari perangkat penerima.



Gambar 16. RSL vs Jarak untuk Antena Omnidireksional Bawaan Pabrik



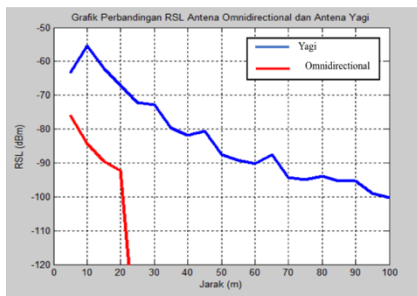
Gambar 17. Data dari Mission Planner (Antena Omnidireksional Bawaan)



Gambar 18. RSL vs Jarak untuk Antena Yagi Rancangan



Gambar 19. Data dari Mission Planner (Antena Yagi Rancangan)

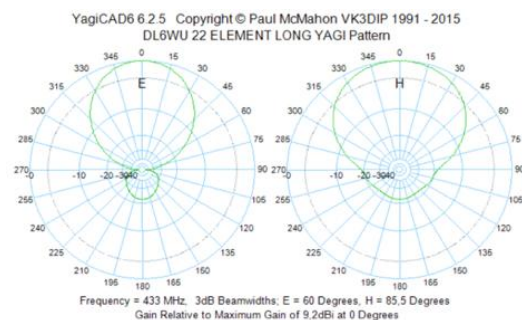


Gambar 20. Perbandingan RSL terhadap Jarak antara Antena Yagi dan Omnidireksional

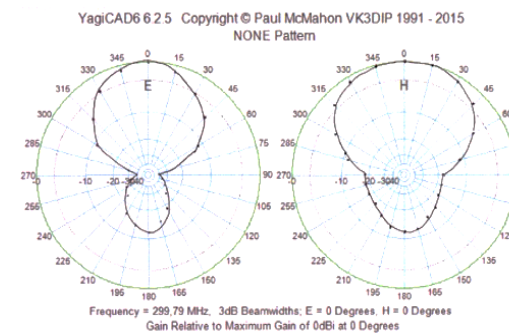
Gambar 16–17 menyajikan grafik RSL terhadap jarak menggunakan antena omnidireksional bawaan pabrik. Daya pancar yang digunakan adalah 1 dBm, dan gain antena sebesar 2,5 dBi. Sementara itu, Gambar 18–19 menunjukkan data RSL yang diperoleh menggunakan antena directional Yagi hasil rancangan. Daya pancar yang digunakan sama dengan pengukuran sebelumnya. Perbandingan antara antena omnidireksional bawaan pabrik dan antena Yagi rancangan ditampilkan pada Gambar 20.

4.3. PENGUKURAN POLA RADIASI ANTENA

Pola radiasi dari antena Yagi yang dirancang, hasil simulasi menggunakan YagiCAD6, ditunjukkan pada Gambar 21. Gambar tersebut menyajikan pola radiasi horizontal dan vertikal dari antena hasil simulasi. Sementara itu, pola radiasi yang diukur secara manual dari antena hasil rancangan ditampilkan pada Gambar 22, yang diperoleh melalui uji lapangan.



Gambar 21. Pola Radiasi Horizontal dan Vertikal dari Antena Rancangan (Simulasi)



Gambar 22. Pengukuran Langsung Pola Radiasi Antena Rancangan

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan keberhasilan implementasi antena *directional* Yagi dengan gain tinggi dan terintegrasi dengan *antenna tracker* berbasis GPS untuk meningkatkan performa komunikasi telemetri UAV pada frekuensi 433 MHz. Hasil pengujian menunjukkan bahwa antena omnidireksional bawaan hanya memberikan jangkauan komunikasi terbatas sebesar 20,37 meter dengan daya pancar 1 dBm dan nilai RSSI akhir sebesar 64. Sinyal ini tidak mencukupi untuk memenuhi ambang batas minimum RSL sebesar -117 dBm yang ditetapkan oleh spesifikasi perangkat telemetri.

Sebaliknya, sistem antena Yagi yang dibangun secara signifikan meningkatkan jangkauan komunikasi. Dengan sedikit modifikasi jarak antara *director* dan elemen driven dihasilkan perbaikan nilai VSWR menjadi 1,05, antena mampu mencapai jarak efektif maksimum sebesar 96,43 meter dengan daya pancar minimum yaitu 1 dBm. Nilai RSSI akhir yang terukur pada jarak ini adalah 51, menghasilkan RSL sebesar -100,158 dBm, yang masih berada dalam rentang yang dapat diterima untuk komunikasi telemetri baik.

Analisis lanjutan terhadap propagasi sinyal dalam kondisi luar ruang *Line-of-Sight* (LoS) menunjukkan bahwa nilai teoritis RSL adalah sebesar -53,58 dBm, yang dihitung menggunakan rumus standar dengan EIRP sebesar 12,75 dBm dan *Free Space Loss* (FSL) sebesar 66,01 dB. Penyimpangan antara nilai RSL teoritis dan hasil pengukuran disebabkan oleh beberapa faktor seperti ketidaksempurnaan penyelarasan antena, interferensi multipath, dan keterlambatan perangkat lunak dalam pencatatan data melalui Mission Planner. Meskipun demikian, baik hasil teoritis maupun

hasil lapangan menunjukkan bahwa sistem ini memiliki ketahanan yang baik.

Mengingat perangkat telemetri dapat diatur untuk memancarkan daya hingga 20 dBm (100 mW), desain ini diperkirakan dapat dengan mudah memenuhi atau bahkan melampaui cakupan target sejauh 2000 meter, terutama di lingkungan terbuka dan keadaan LOS. Oleh karena itu, kombinasi antara rekayasa antena Yagi dengan gain tinggi dan *antenna tracker* berbasis GPS terbukti menjadi solusi yang efektif untuk aplikasi telemetri UAV di kondisi dinamis dan lokasi terpencil.

Untuk penelitian selanjutnya, beberapa aspek dapat lebih disempurnakan dan dikembangkan. Pertama, mekanisme pelacak antena dapat ditingkatkan dengan mengintegrasikan unit pengukuran inersia (IMU) untuk koreksi orientasi yang lebih presisi, terutama dalam kondisi berangin atau saat manuver UAV. Kedua, pengujian telemetri perlu diperluas ke skenario *Non-Line-of-Sight* (NLoS) atau lingkungan perkotaan untuk memberikan wawasan lebih dalam tentang keandalan antena ini.

Selain itu, optimalisasi sistem dapat mencakup dukungan antena multi-band untuk menyesuaikan dengan berbagai frekuensi telemetri. Pengujian jangkauan yang lebih panjang dengan menggunakan daya pancar penuh 20 dBm serta validasi sistem pada berbagai profil medan seperti hutan, perbukitan, atau kawasan pesisir akan semakin memperkuat bukti skalabilitas sistem. Terakhir, penerapan komunikasi *realtime* antara kualitas sinyal dan pergerakan pelacak (misalnya menggunakan ambang RSL atau RSSI) berpotensi meningkatkan presisi pelacakan dan stabilitas komunikasi secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. C. Chan, S. A. Alvi, X. Zhou, S. Durrani, N. Wilson, and M. Yebra, "A Survey on IoT Ground Sensing Systems for Early Wildfire Detection: Technologies, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 172785–172819, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3501336.
- [2] E. D. Wardihani *et al.*, "REAL-TIME FOREST FIRE MONITORING SYSTEM USING UNMANNED AERIAL VEHICLE," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 6, pp. 1587–1594, 2018.
- [3] J. Valente, D. Sanz, A. Barrientos, J. D. Cerro, Á. Ribeiro, and C. Rossi, "An Air-Ground Wireless Sensor Network for Crop Monitoring," *Sensors*, vol. 11, no. 6, pp. 6088–6108, June 2011, doi: 10.3390/s110606088.
- [4] M. A. Al-Shareeda, M. A. Saare, and S. Manickam, "Unmanned aerial vehicle: a review and future directions," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 30, no. 2, p. 778, May 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v30.i2.pp778-786.
- [5] B. Nursakinah, K. Syafitri, M. A. Wijaya, and F. Fahlapi, "ANALISIS PENGARUH JARAK DAN HALANGAN PADA TRANSMISI DATA JARINGAN NIRKABEL DENGAN MENGGUNAKAN METODE SIGNAL- TO- NOISE RATIO (SNR)," *JUTECH J. Educ. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 183–197, June 2025, doi: 10.31932/jutech.v6i1.4955.
- [6] N. Chasanah, I. Rismayanti, W. Try Kusuma, F. S. Pranoto, Y. Prabowo, and D. Kusumoaji, "Performance Investigation of Link Failure Line-of-Sight (LOS) Communication UAV," in *2022 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)*, Yogyakarta, Indonesia: IEEE, Nov. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICARES56907.2022.9993526.
- [7] E. R. Juma, "IMPLEMENTASI DAN ANALISIS KINERJA SISTEM AUTOMATIC TRACKING CONTROL POLARISASI ANTENA PENERIMA FREKUENSI 433 MHz BERBASIS GPS," *E-Proceeding Eng.*, vol. Vol.2, no. 1, pp. 185–192, Apr. 2015.
- [8] A. Azhar, S. M. A. Sasongko, and D. F. Budiman, "IMPLEMENTASI PURWARUPA WIRELESS SENSOR NETWORK UNTUK MONITORING DAN PENYIRAMAN OTOMATIS PADA TANAMAN MINT MENGGUNAKAN ESP32 BERBASIS IoT-LoRa," *J. Inform. Dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3, Aug. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4678.
- [9] R. Candra and B. Busran, "IMPLEMENTASI JARINGAN WSN PADA SISTEM DETEKSI BANJIR MENGGUNAKAN MODUL NRF24L01 PA + NA," *J. Inform. Dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3S1, Oct. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7624.
- [10] A. N. S.T., M.Eng., M. G. Zaki, D. R. Hidayatulloh, and R. F. Mubarak, "RANCANG BANGUN QUADCOPTER MODULAR SEBAGAI WAHANA PEMBAWA BANNER," *J. Inform. Dan Tek.*

- Elektro Terap.*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.5751.
- [11] I. Khoerunnisa, A. F. Ikhsan, and A. Hasyim, "Perancangan dan Analisis Antena Yagi-Uda pada Frekuensi 433 Mhz untuk Sistem Komunikasi Radiosonde dan Ground Control Station (GCS)," *Fuse-Tek. Elektro*, vol. 1, no. 1, p. 15, June 2021, doi: 10.52434/jft.v1i1.1152.
- [12] D. H. T. Nugroho and M. F. Hasan, "RANCANG BANGUN ANTENA YAGI 433 MHZ PADA AUTOMATIC ANTENNA TRACKER UNTUK PESAWAT TERBANG TANPA AWAK," *J. Ecotipe Electron. Control Telecommun. Inf. Power Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 20–25, Apr. 2020, doi: 10.33019/ecotipe.v7i1.1390.
- [13] G. Nugroho and D. Dectaviansyah, "Design, manufacture and performance analysis of an automatic antenna tracker for an unmanned aerial vehicle (UAV)," *J. Mechatron. Electr. Power Veh. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 32–40, July 2018, doi: 10.14203/j.mev.2018.v9.32-40.
- [14] M. Melvi *et al.*, "Perancangan Antena Yagi Gain Tinggi Pada Ground Control Station Wahana Udara Nirawak," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 16, no. 3, Dec. 2020, doi: 10.17529/jre.v16i3.18682.
- [15] D. Tyrovolas, S. A. Tegos, P. D. Diamantoulakis, and G. K. Karagiannidis, "Synergetic UAV-RIS Communication with Highly Directional Transmission," 2021, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2106.10034.
- [16] F. Octaviani and H. Abrianto, "RANCANG BANGUN DAN IMPLEMENTASI ANTENA YAGI UDA UNTUK KOMUNIKASI JARINGAN WLAN," *SINUSOIDA*, vol. 20, no. 4, pp. 41–51, Oct. 2018, doi: 10.37277/s.v20i4.820.
- [17] D. N. Rokhman, A. R. Darlis, and L. Lidyawati, "IMPLEMENTASI ANTENA YAGI 5 ELEMEN SEBAGAI PENERIMA SIARAN TELEVISI DI BANDUNG KOTA," *J. Elektro Dan Telekomun. Terap.*, vol. 3, no. 1, Aug. 2016, doi: 10.25124/jett.v3i1.128.
- [18] A. Saputra, H. Hanesman, and S. Sukaya, "ANALISIS PENGARUH SPACING ANTAR ELEMEN TERHADAP GAIN PADA ANTENA YAGI 5 ELEMEN FREKUENSI 2,4 GHz," *Voteteknika Vocat. Tek. Elektron. Dan Inform.*, vol. 3, no. 1, Sept. 2015, doi: 10.24036/voteteknika.v3i1.5178.
- [19] S. Triyadi, D. Suryadi, N. Tjahjamoonsih, and J. H. H. Nawawi, "RANCANG BANGUN ANTENA YAGI MODIFIKASI DENGAN FREKUENSI 2,4 GHZ UNTUK MENINGKATKAN DAYA TERIMA WIRELESS USB ADAPTER TERHADAP SINYAL WIFI," *J. Electr. Eng. Energy Inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, July 2017, doi: 10.26418/j3eit.v5i3.20668.
- [20] M. Arrofiq and A. Fauzi, "Received Signal Level (RSL) Strength Assessment of 2.4 GHz in A Hotel Meeting Room," *J. Internet Softw. Eng.*, vol. 1, no. 1, p. 8, Dec. 2020, doi: 10.22146/jise.v1i1.762.
- [21] "Received Signal Strength Indication (RSSI) — Copter documentation." Accessed: Oct. 25, 2025. [Online]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-rssi-received-signal-strength-indication.html>
- [22] Oscar, "LQ and RSSI Explained for ExpressLRS and Crossfire Radio Links," Oscar Liang. Accessed: Oct. 25, 2025. [Online]. Available: <https://oscarliang.com/lq-rssi/>