

**RANCANG BANGUN DAN IMPLEMENTASI MODUL RADIO
TELEMETRI PADA *AERIAL MEASSUREMENT EDDY COVARIANCE*
SYSTEM (AMES) DENGAN *BAND* FREKUENSI 433 MHZ**

(Skripsi)

Oleh:

MUHAMMAD RHAMADANI

2115031075



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2025

**RANCANG BANGUN DAN IMPLEMENTASI MODUL RADIO
TELEMETRI PADA *AERIAL MEASSUREMENT EDDY COVARIANCE*
SYSTEM (AMES) DENGAN *BAND* FREKUENSI 433 MHZ**

Oleh

MUHAMMAD RHAMADANI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

RANCANG BANGUN DAN IMPLEMENTASI MODUL RADIO TELEMETRI PADA *AERIAL MEASSUREMENT EDDY COVARIANCE SYSTEM* (AMES) DENGAN *BAND* FREKUENSI 433 MHZ

Oleh

MUHAMMAD RHAMADANI

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan menerapkan modul radio telemetri berbasis frekuensi 433 MHz untuk sistem pengukuran *Aerial Meassurement Eddy Covariance System* (AMES) yang terintegrasi dengan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Chip LoRa SX1268 digunakan sebagai *transceiver* dan ESP32 sebagai mikrokontroler untuk sistem telemetri, yang mendukung komunikasi dua arah dengan protokol *Mavlink*. Modul telemetri dirancang sebagai *prototipe* dengan rancangan PCB *multilayer* untuk modul radio dan modul *Microcontroller Unit* (MCU), dan proses perancangan mencakup pemilihan komponen, penyesuaian impedansi RF, simulasi filter *band-pass*, dan penyolderan menggunakan teknik plat panas. Pengujian melibatkan UAV VTOL untuk menguji keandalan transmisi data telemetri ke *Ground Control Station* (GCS) menggunakan *Mission Planner*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa modul telemetri ini dapat mengirimkan data secara *real-time* dari wahana UAV ke GCS dengan efisiensi dan stabilitas yang tinggi. Studi ini mendukung pengembangan teknologi komunikasi nirkabel untuk tujuan lingkungan dan meteorologi.

Kata kunci: UAV, komunikasi jarak jauh, LoRa, 433 MHz, *Mavlink*, AMES, PCB, ESP32, dan SX1268.

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF RADIO TELEMETRY MODULE IN AERIAL MEASSUREMENT EDDY COVARIANCE SYSTEM (AMES) WITH 433 MHZ FREQUENCY BAND

by

MUHAMMAD RHAMADANI

The purpose of this research is to develop and implement a 433 MHz frequency-based radio telemetry module for an Aerial Measurement Eddy Covariance System (AMES) integrated with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The LoRa SX1268 chip is used as a transceiver and ESP32 as a microcontroller for the telemetry system, which supports bidirectional communication with the Mavlink protocol. The telemetry module is designed as a prototype with a multilayer PCB design for the radio module and the Microcontroller Unit (MCU) module, and the design process includes component selection, RF impedance adjustment, band-pass filter simulation, and soldering using a hot-plate technique. The test involves a VTOL UAV to test the reliability of telemetry data transmission to the Ground Control Station (GCS) using Mission Planner. The test results show that this telemetry module can transmit data in real-time from the UAV to the GCS with high efficiency and stability. This study supports the development of wireless communication technology for environmental and meteorological purposes.

Keywords: UAV, long-range communication, LoRa, 433 MHz, MAVLink, AMES, PCB, ESP32, and SX1268.

Judul Skripsi

: RANCANG BANGUN DAN IMPLEMENTASI
MODUL RADIO TELEMETRI PADA *AERIAL
MEASSUREMENT EDDY COVARIANCE
SYSTEM (AMES) DENGAN BAND
FREKUENSI 433 MHZ*

Nama Mahasiswa

: **Muhammad Rhamadani**

Nomor Pokok Mahasiswa

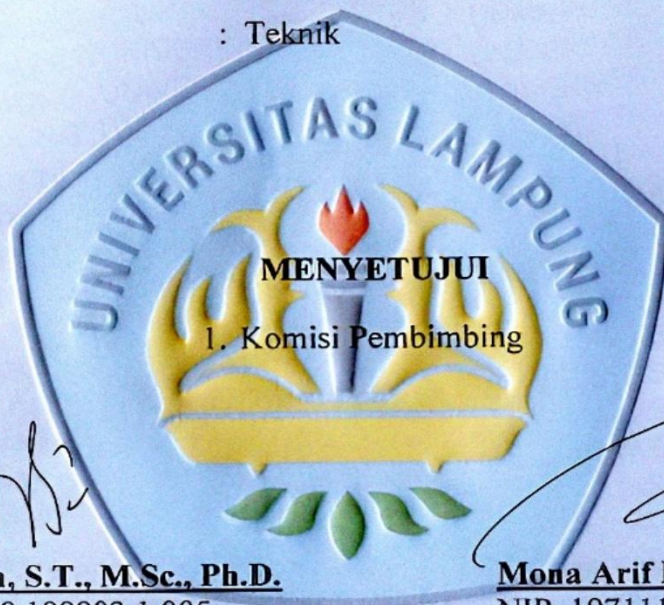
: 2115031075

Program Studi

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik



Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 19731128 199903 1 005

Mona Arif Muda, S.T., M.T.

NIP. 19711112 200003 1 002

2. Mengetahui

Ketua Jurusan

Teknik Elektro

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Herlinawati'.

Herlinawati, S.T., M.T.

NIP.197103141999032001

Ketua Program Studi

Teknik Elektro

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Sumadi'.

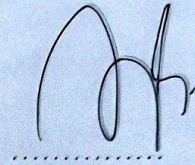
Sumadi, S.T., M.T.

NIP.197311042000031001

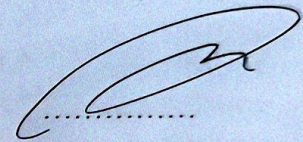
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

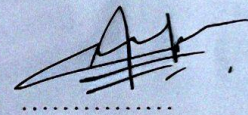
Ketua : **Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D.**



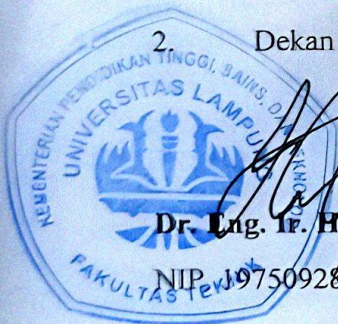
Sekretaris : **Mona Arif Muda, S.T., M.T.**



Penguji : **Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 10 Oktober 2025

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Oktober 2025



Muhammad Rhamadani

NPM. 2115031075

Riwayat Hidup



Penulis dilahirkan di Simpang Luas pada tanggal 28 November 2002, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari Bapak Surono dan Sariyati.

Pendidikan Sekolah Dasar diselesaikan di SDN 02 Bakhu, Kec. Batu Ketulis, Kab. Lampung Barat pada tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Belalau, Kec. Belalau, Kab. Lampung Barat diselesaikan pada tahun 2018, dan Sekolah Menengah Kejuruan di SMKN 1 Liwa, Kec. Balik Bukit, Kab. Lampung Barat dengan jurusan Teknik Komputer dan Jaringan yang diselesaikan pada tahun 2021.

Tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif mengikuti Organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) Universitas Lampung sebagai anggota Divisi Pengabdian Masyarakat pada tahun 2022 dan Divisi Media Informasi pada tahun 2023. Penulis mengambil konsentrasi Telekomunikasi dan Teknologi Informasi dan secara aktif mengikuti kegiatan akademik di konsentrasi tersebut. Beberapa kegiatan akademik pada lingkup tersebut yang diikuti oleh penulis di antaranya lolos sebagai finalis dalam kegiatan Lomba Inovasi Digital Mahasiswa (LIDM) di Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) pada tahun 2023, MBKM riset microclimate di Wilayah Hutan Wisata Mangrove desa Gebang Petengoran, menjadi peserta dalam kegiatan SCoMOA (*Summer Course on Modern Optics and Its Applications*) yang diadakan di Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2023, mengikuti MBKM studi independen *Indobot Academy IoT Engineer* pada tahun 2024, lolos sebagai juara 2 pada divisi *Long Endurance Low Altitude* (LELA) dalam kegiatan Kontes Robot Terbang Indonesia (KRTI) pada tahun 2024 dengan Universitas Negeri Yogyakarta (UNY) sebagai tuan rumah, dan menjadi peserta dalam acara Pekan Riset Sawit Indonesia (PERISAI) pada tahun 2024.

PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan segala puji syukur bagi Allah atas berkah rahmat dan karunia-Nya, Kupersembahkan karya ini dengan rasa syukur, hormat dan kasih sayang kepada:

**“Kepada Kedua Orang Tuaku,
Bapakku Surono dan Ibuku Sariyati”.**

Atas segala doa, kasih sayang, kepercayaan, dan pengorbanan yang tiada henti. Terima kasih telah menjadi sumber kekuatan dan perlindungan dalam setiap langkah perjalanan ini. Berkat kalian, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

“Kepada Diri Sendiri Muhammad Rhamadani ”.

Atas segala usaha, ketekunan, dan semangat yang tak pernah padam, serta atas keteguhan untuk terus bertahan dan melangkah. Skripsi ini tidak sempurna tapi cukup untuk membuat penulis wisuda dan mendapatkan gelar S.T. Semoga ini menjadi awal dari perjalanan yang lebih baik, dan kiranya segala langkah ke depan selalu disertai oleh Tuhan

SANWACANA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang Maha Esa sehingga dengan izin-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun dan Implementasi Modul Radio Telemetry Pada *Aerial Measurement Eddy Covariance System* (AMES) Dengan *Band* Frekuensi 433 MHz” dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam proses penyusunannya, penulis mendapatkan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu, khususnya kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Ibu Sri Purwiyanti, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan dan dukungan kepada penulis.
6. Bapak Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Utama atas segala waktu yang telah diluangkan untuk memberikan bimbingan, nasihat, arahan dan juga motivasi yang membangun kepada penulis.
7. Bapak Mona Arif Muda, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Pendamping atas segala waktu yang telah diluangkan untuk memberikan bimbingan, nasihat, arahan dan juga motivasi yang membangun kepada penulis.
8. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Penguji atas segala waktu yang telah diluangkan untuk memberikan bimbingan, nasihat, arahan dan juga motivasi yang membangun kepada penulis.

9. Segenap dosen di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama menempuh pendidikan di perkuliahan.
10. Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Surono dan Ibu Sariyati, atas segala cinta, doa, dukungan, dan pengorbanan yang tiada henti sejak awal hingga detik ini. Terima kasih atas ketulusan dalam membesarkan, membimbing, dan mendampingi penulis dengan kasih yang tidak ternilai. Tanpa kekuatan doa, kerja keras, dan semangat yang terus Bapak dan Ibu tanamkan, pencapaian ini tidak akan pernah menjadi nyata. Semoga Tuhan membalas setiap kebaikan dan jerih payah Bapak dan Ibu dengan berkat yang berlimpah.
11. Ucapan terima kasih kepada keluarga besarku, yang selalu menjadi sumber inspirasi dan motivasi serta memberikan dukungan tanpa henti sepanjang penulisan skripsi ini. Maaf atas sikapku yang sering kali keras kepadamu. Namun, ketahuilah bahwa rasa sayangku padamu sangat besar, dan semua itu lahir dari keinginanku agar dirimu bisa menjadi pribadi yang lebih baik dariku. Terima kasih telah selalu bersabar, memahami, dan tetap mendukungku.
12. Teruntuk teman seperjuangan para Engineer muda, Bagus Munawar, Tirta Pratama, Kelana Abimanyu, I Nengah Marcel, Luis Pirnando, Wisnu Tubagus, Akmal Dwiki Wijaya, Steevan Urian Robiyanto, Dwikashinta Purwanda Putra, M. Nusapati Dwipa Nusantara, dan Dimas Husen. Terima kasih atas tawa, semangat, diskusi panjang, serta kebersamaan yang tak ternilai. Terima kasih atas setiap momen yang kita lewati bersama. Kebersamaan dan dukungan kalian membuat perjalanan ini lebih berarti. Semoga sukses selalu menyertai kita semua.
13. Seluruh teman-teman Telekomunikasi dan Teknologi Informasi 2021 yang telah memberikan dukungan, semangat dan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
14. Keluarga Besar Himatro Unila yang telah memberikan pengalaman tak terlupakan kepada penulis.
15. Keluarga Besar Unila Robotika dan Otomasi yang telah memberikan pengalaman tak terlupakan kepada penulis.

16. Seluruh pihak yang telah membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, maka dari itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak. Semoga skripsi ini dapat membantu dan memberikan manfaat bagi penulis dan para pembaca.

Bandar Lampung, 10 Oktober 2025

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Muhammad Rhamadani', written in a cursive style.

Muhammad Rhamadani

MOTTO

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا ﴿٥﴾ إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا ﴿٦﴾

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan pasti ada kemudahan, sesungguhnya bersama kesulitan pasti ada kemudahan”.

(QS. Al-Insyirah (94): 5-6)

يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ

Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman di antara kamu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat.

(QS. Al-Mujadilah (58): 11)

Setiap kata yang kamu tulis adalah langkah kecil menuju gelar sarjana. Tetap menulis, tetap semangat!

Skripsi mengajarkanmu lebih dari sekadar akademis, ia mengajarkanmu tentang disiplin, manajemen waktu, dan ketangguhan mental.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL.....	vi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan penelitian.....	2
1.3 Rumusan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Penelitian Terkait.....	4
2.2 Penggunaan Frekuensi 433 MHz Pada <i>Telemetry</i> UAV.....	6
2.3 Aplikasi Telemetry 433 MHz Pada UAV AMES	6
2.4 Tantangan Dalam Implementasi <i>Telemetry</i> 433 MHz Pada UAV AMES ...	7
2.5 Chip Modul Radio <i>Long Range</i> (LoRa).....	7
2.6 <i>Microcontroller Unit</i> (MCU)	8
2.7 Metode Penapisan Sinyal	10
2.8 Kesesuaian Impedansi Sistem	12
2.9 <i>Propagation Model</i>	13
2.10 <i>Link Budget</i>	16
2.11 Penyesuaian RLC dan Penapis Sinyal pada <i>Transceiver</i>	17
2.12 Pengaturan <i>Time-Stamp</i>	19
2.13 Antena.....	20
2.14 <i>Flight Controller</i> Pixhawk	21

2.15 <i>Software</i> Arduino IDE.....	21
2.16 <i>Software</i> Proteus	22
2.17 <i>Software</i> Smith v4.1.....	23
2.18 <i>Software</i> EasyEDA PCB Design.....	23
2.19 <i>Soldering</i>	23
2.20 <i>Hot Plate Soldering</i>	24
2.21 RSSI	25
2.22 SNR	26
2.23 Modul Radio Terdahulu	27
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2 <i>Capstone Project</i>	28
3.3 Alat dan Bahan	30
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	32
3.4 Rancangan Sistem	33
3.5 Rancangan Desain PCB.....	35
3.5.1 <i>Schematic</i> Modul <i>Radio Frequency</i> (RF) 433 MHz.....	38
3.5.2 <i>Schematic</i> Modul MCU <i>Telemetry</i>	45
3.5.3 Desain PCB Modul Radio 433 MHz	48
3.5.4 Desain PCB Modul MCU <i>Telemetry</i>	50
3.6 Implentasi Komponen Pada PCB	53
3.7 Pemrograman.....	57
3.8 Skenario Pengujian.....	58
BAB IV PEMBAHASAN DAN HASIL.....	61
4.1 Pengujian Fungsionalitas.....	61
4.2 Pengujian Performa	65

4.3 Pengujian Komunikasi <i>MAVLink</i>	78
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	81
5.1 Kesimpulan.....	81
5.1 Saran	82
DAFTAR PUSTAKA.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Package Markin</i>	8
Gambar 2.2 ESP32 WROOM 32E	9
Gambar 2.3 Ilustrasi <i>Band Pass Filter</i>	10
Gambar 2.4 Contoh <i>Schematic Balance-Unbalance</i> (Balun) tipe L-C	13
Gambar 2.5 SMD Resistor	18
Gambar 2.6 SMD Inductor	18
Gambar 2.7 SMD Capacitor	19
Gambar 2.8 <i>Crystal Oscillator</i>	20
Gambar 2.9 Pola radiasi/daya antena <i>telex</i>	21
Gambar 2.10 <i>Flight Controller Pixhawk</i>	22
Gambar 2.11 <i>Hot Plate Soldering</i>	25
Gambar 2.12 Modul Radio Terdahulu	27
Gambar 3.1 Pembagian <i>Capstone Project</i>	30
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian	33
Gambar 3.3 Alur Komunikasi Sistem Telemetry	34
Gambar 3.4 Diagram Blok <i>Hardware</i> Telemetry	376
Gambar 3.5 <i>Impedance Calculator</i>	378
Gambar 3.6 Referensi skematik SX1268MB1GAS_490MHz	39
Gambar 3.7 Skematik Final Modul Radio 433 MHz	40
Gambar 3.8 Grafik Simulasi <i>Band Pass Filter</i> dengan <i>Proteus</i>	41
Gambar 3.9 Grafik simulasi <i>matching impedance</i> pada <i>input rf amplifier</i>	43
Gambar 3.10 Grafik simulasi <i>matching impedance</i> pada <i>output rf amplifier</i>	45
Gambar 3.11 Referensi Desai Skematik MCU Telemetry	47
Gambar 3.12 Skematik Final Modul MCU Telemetry	48
Gambar 3.13.a Desain PCB Modul Radio 433 MHz <i>Layer 1</i>	49
Gambar 3.13.b Desain PCB Modul Radio 433 MHz <i>Layer 2</i>	50
Gambar 3.13.c Desain PCB Modul Radio 433 MHz <i>Layer 3</i>	50
Gambar 3.14 Tampak 3D PCB Modul Radio 433 MHz	51
Gambar 3.15.a Desain PCB Modul MCU <i>Telemetry Layer 1</i>	52

Gambar 3.15.b Desain PCB Modul MCU <i>Telemetry Layer 2</i>	53
Gambar 3.15.c Desain PCB Modul MCU <i>Telemetry Layer 3</i>	53
Gambar 3.15.d Desain PCB Modul MCU <i>Telemetry Layer 4</i>	54
Gambar 3.16 Tampak 3D PCB Modul MCU <i>Telemetry</i>	54
Gambar 3.17 Timah Pasta.....	55
Gambar 3.18 Proses aplikasi timah pasta dengan <i>stencil</i>	55
Gambar 3.19 Proses pemanasan dengan <i>Hot Plate Soldering</i>	56
Gambar 3.20 Proses solder <i>Push Button</i> secara manual	57
Gambar 3.21 Telemetri yang sudah dihubungkan dengan kabel	57
Gambar 3.22 Proses penyatuan modul MCU dengan modul radio.....	58
Gambar 3.23 Unit telemetri 433 MHz setelah di satukan.....	58
Gambar 3.24 Diagram Alir Program Telemetri	59
Gambar 4.1 Pengujian Tegangan Regulator	63
Gambar 4.2 <i>Port COM</i> dari MCU pada <i>device manager</i>	64
Gambar 4.3 Pengujian upload program kendali LED	64
Gambar 4.4 Uji komunikasi modul MCU dengan modul Radio	65
Gambar 4.5 Grafik <i>Spectrum analyzer</i> pada pengujian pertama	66
Gambar 4.6 Jumper pada jalur <i>amplifier</i>	66
Gambar 4.7 Grafik <i>Spectrum analyzer</i> setelah di-jumper.....	67
Gambar 4.8 Pengujian dengan jarak 20 cm	68
Gambar 4.9 Peta jarak 30 kilometer.....	69
Gambar 4.10 Grafik <i>terrain</i> antar node pada jarak 30 km.....	70
Gambar 4.11 Ketinggian node pengirim dengan menggunakan <i>drone</i>	71
Gambar 4.12 Grafik perbandingan Jarak dan RSSI	75
Gambar 4.13 Grafik perbandingan Jarak dan SNR.....	76
Gambar 4.14 Grafik perbandingan Jarak dan <i>Packet Delay</i>	77
Gambar 4.15 Penempatan <i>Pixhawk Flight Controller</i> pada <i>Platform</i>	80
Gambar 4.16 Proses koneksi dengan <i>Pixhawk</i> pada <i>Mission Planner</i>	81
Gambar 4.17 Pengujian <i>Link</i> dan Transfer Data	81
Gambar 4.18 Hasil Pengujian Kecepatan Transfer Data	82
Gambar 4.19 Hasil Pengujian Kecepatan Transfer Data	82
Gambar 4.20 Kecepatan Transfer Data ketika <i>Upload</i> misi	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi SX1268	8
Tabel 2.2 Spesifikasi ESP32 Wroom.....	10
Tabel 3.1 Komponen yang digunakan	31
Tabel 3.2 Komponen <i>Software</i>	33
Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian pada <i>Spreading Factor</i> 7.....	71
Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian pada <i>Spreading Factor</i> 8.....	73
Tabel 4.2 Parameter <i>Link Budget</i>	78

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan kemajuan zaman di era globalisasi, perkembangan teknologi yang semakin pesat tidak dapat dipungkiri. Salah satunya adalah *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau biasa dikenal dengan *drone*. Pemanfaatan teknologi UAV sangat beragam contohnya pemetaan, pengawasan lingkungan, dan pengiriman logistik saat terjadi bencana [1][2]. Dalam pengoperasian *drone* dibutuhkan sistem komunikasi di antara *drone* dengan *Ground Control Station* (GCS) [3]. Teknologi yang dibutuhkan untuk pengiriman atau penerimaan data antara *drone* dengan *Ground Control Station* (GCS) adalah *telemetry*. Data tersebut dapat berupa informasi kecepatan, data penerbangan, dan koordinat.

Penggunaan spektrum frekuensi radio di Indonesia sudah diatur dalam Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Nomor 7 Tahun 2021 dan secara khusus dibahas dalam Peraturan Pemerintah Nomor 28 Tahun 2005 tentang segmentasi frekuensi yang diperbolehkan yaitu dari 9 kHz hingga 3000 MHz [4]. Penelitian ini menggunakan spektrum frekuensi modul radio sebesar 433 MHz yang cocok digunakan untuk menghindari hambatan pada wilayah yang luas karena frekuensi ini memiliki panjang gelombang 69,2 cm yang diperoleh dengan persamaan $\lambda = \frac{c}{f}$, dimana c adalah kecepatan cahaya di ruang hampa (sekitar 3×10^8 m/s) dan f adalah frekuensi sinyal dalam satuan *hertz*. Penggunaan *telemetry* frekuensi 433 MHz pada teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) seperti pada penelitian ini memiliki peran yang sangat penting yaitu sebagai pengirim informasi. Informasi tersebut yang kemudian akan dikirimkan dari *drone* ke *Ground Control Station* (GCS).

Frekuensi 433 MHz dipilih karena menyesuaikan wilayah Asia dengan ketentuan *Industrial, Science, Medical* (ISM) [5]. Penggunaan frekuensi 433 MHz bukan tanpa alasan, jika dibandingkan dengan frekuensi 915 MHz, frekuensi 433 MHz memiliki *path loss* atau kehilangan daya sinyal yang lebih kecil dalam proses

transmisi data namun tetap dengan kompromi *bandwidth* yang cukup lebar untuk menunjang *data rate* atau jumlah bit yang bisa di transmisikan dari pemancar ke penerima dalam satuan detik, satuannya biasanya bps (*bits per second*) [6]. Metode yang akan digunakan adalah *reverse engineering method* yaitu metode yang mempelajari dan merancang kembali suatu komponen atau produk yang sebelumnya sudah ada sebagai acuan untuk merancang produk sejenis dengan memperkecil dan meningkatkan kualitas produk. Metode ini digunakan dengan tujuan untuk mendapatkan data yang valid dan efisien [7]. Namun, dalam penerapan *telemetry* banyak hal yang perlu diperhatikan diantaranya luas jangkauan, konsumsi daya, dan adanya hambatan dalam transmisi data.

Berdasarkan latar belakang di atas, terlihat bahwasanya penelitian tentang modul radio sangat diperlukan untuk pengiriman data dengan pengendalian dari jarak jauh. Solusi yang dapat menjawab permasalahan di atas adalah dengan memanfaatkan pita frekuensi radio 433 MHz yang menggunakan teknologi *Long Range* (LoRa) untuk mengoptimalkan jangkauan dengan transmisi data yang minim hambatan. Pengembangan sistem *telemetry* ini mencakup desain, implementasi, dan pengujian komunikasi antara *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan *Ground Control Station* (GCS). Oleh karena itu, perancangan sistem telemetri ini dapat berkontribusi untuk penelitian teknologi komunikasi nirkabel pada masa mendatang.

1.2 Tujuan penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat sebuah sistem *radio telemetry* untuk komunikasi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dengan *Ground Control Station* (GCS) menggunakan protokol *MAVlink* yang memungkinkan pengiriman data *telemetry-log* dari *flight controller* pada UAV ke GCS.
2. Membuat rancangan skematik modul *radio telemetry* dengan frekuensi 433MHz.
3. Membuat prototipe modul *radio telemetry* frekuensi 433 MHz dengan daya pancar 33 dBm.
4. Menerapkan *telemetry* pada *Flight Controller* di *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

1.3 Rumusan Masalah

Adapun Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana membangun sebuah sistem yang memungkinkan *Flight Controller* pada *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dapat berkomunikasi dengan *Ground Control Station* (GCS) menggunakan protocol *MAVlink* yang memungkinkan pengiriman data *telemetry-log* dari *flight controller* pada UAV ke GCS.
2. Bagaimana membuat prototipe modul *radio telemetry* dengan frekuensi 433 MHz ?
3. Bagaimana penerapan telemetri pada *Flight Controller* di *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV)?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada pengerjaan tugas akhir ini adalah :

1. Penelitian hanya berfokus untuk membuat sebuah sistem *telemetry* dimana *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dapat berkomunikasi dengan *Ground Control Station* (GCS) menggunakan protocol *MAVlink*.
2. Frekuensi yang digunakan *telemetry* pada penelitian ini adalah 433 MHz.
3. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan drone *Vertical Take-off and Landing* (VTOL).
4. Antena yang digunakan pada penelitian adalah antena *Dipole* pada sisi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan antena *Telex* pada sisi *Ground Control System* (GCS).

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat memberikan manfaat dalam pengembangan sistem *telemetry* yang lebih handal, stabil, dan fleksibel. Integrasi protokol *MAVLink* memastikan komunikasi yang lebih stabil antara *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan *Ground Control Station* (GCS), bahkan di lingkungan dengan hambatan fisik. Selain itu, penelitian ini mengoptimalkan perancangan modul *Radio Frekuensi* (RF) dan *Microcontroller Unit* (MCU) *telemetry* melalui desain *Printed Circuit Board* (PCB) khusus, yang meningkatkan efisiensi transmisi data. Dengan sistem ini, pengambilan dan pengiriman data atmosfer menjadi lebih efektif dan *real-time*, mendukung riset lingkungan dan meteorologi secara lebih akurat.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian skripsi ini dibuat dengan menganalisis hasil dari penelitian sebelumnya yang sejenis dalam beberapa tahun terakhir, Jorge Simon *et al.* [8] membahas tentang miniatur stasiun bumi yang berbasis *Internet-of-Things* (IoT). Perangkat ini menggunakan frekuensi 433MHz untuk menerima paket *telemetry* dari stasiun *Long Range* (LoRa). Perakitan stasiun menggunakan ESP32 berbasis *receiver* LoRa, antena, baterai isi ulang, satelit, *website*, dan internet. Antena menerima sinyal pada kisaran 433MHz dengan polarisasi melingkar dengan tujuan menghindari kerugian polarisasi. Setelah dirangkai, paket *telemetry* diunduh dan akan tersedia pada *Website TinyGS* dengan format yang berbeda. Penelitian oleh Jorge Simon dkk hanya fokus pada sistem penerima data telemetri berbasis LoRa, sedangkan pada penelitian ini mencakup pengembangan penuh sistem UAV, termasuk modul pengirim dan penerima dengan desain prototipe PCB khusus.

Selain itu, penelitian yang mengulas pemanfaatan LoRa dalam komunikasi *real-time* UAV termasuk integrasi jaringan untuk memaksimalkan jangkauan telah dilakukan oleh Ghazali, M. H. M., *et al.* [9]. Penelitian ini dilaksanakan pada tahun 2021 dengan judul penelitian “*A systematic review of real-time deployments of UAV-based LoRa communication network.*” Studi ini berfokus pada tinjauan sistem komunikasi LoRa berbasis UAV secara *real-time*. Sedangkan penelitian skripsi ini menguji keandalan komunikasi pada frekuensi 433MHz dalam lingkungan dengan hambatan fisik.

Evaluasi sistem kontrol UAV berbasis LoRa dengan fokus pengaruh *path loss* dalam transmisi data telah dilakukan oleh Hariyadi, M. A. *et al.* [6]. Penelitian ini dilakukan pada tahun 2022 dengan judul “*Evaluation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) control range system using LoRa-based communication system using path loss.*”. Sedangkan penelitian skripsi ini merancang sistem telemetri dengan

prototipe PCB khusus, serta mengintegrasikan komunikasi berbasis MAVLink untuk memastikan stabilitas dan keandalan pengiriman data.

Selain itu, F. Minucci [10] melakukan penelitian pada tahun 2023 dengan judul “*Reliable Communication and Accurate Sensing for UAV Traffic Management*”. Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan modul komunikasi berbasis LoRa untuk mengelola lalu lintas UAV. Konsep reliabilitas komunikasi diterapkan dalam penelitian dengan menambahkan protokol *Mavlink* untuk memastikan transmisi data stabil antara UAV dan GCS pada frekuensi 433 MHz. Penelitian ini hanya berfokus pada manajemen lalu lintas UAV dengan modul LoRa standar tanpa memperhatikan aspek pengumpulan data lingkungan atau desain *hardware* khusus. Sedangkan pada penelitian skripsi ini memperluas fokus dengan pengembangan *prototipe* yang mencakup desain PCB *multilayer* untuk telemetri AMES dan pengujian dalam skenario lapangan. *Mavlink* merupakan protokol yang digunakan untuk komunikasi dua arah antara GCS dan UAV. Protokol ini digunakan karena kompatibel dengan *drone* dan tingkat efisien yang besar untuk *bandwidth* terbatas LoRa [11]. *Mavlink* mengandung data telemetri *drone* dan pengukuran AMES dalam format biner untuk kemudian dikirimkan ke *ground station* oleh LoRa, pesan tersebut yang akan didekode dan divisualisasikan oleh *mission planner* dengan memastikan integritas data selama transmisi berlangsung.

Peningkatan sistem kontrol radio *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) yang berbasis LoRa dengan frekuensi 433MHz LoRa telah dibuat oleh Juniardi Nur Fadila [12]. *Radio Frequency* (RF) terbagi menjadi beberapa kategori dan yang sering digunakan adalah *Very High Frequency* (VHF), *Ultra High Frequency* (UHF), dan *Super High Frequency* (SHF). Perbedaan frekuensi tersebut akan menghasilkan panjang gelombang yang berbeda pula. *Telemetry Micro Air Vehicle Communication Protocol* (MAVLINK) adalah telemetri berbasis teknologi modern untuk komunikasi antara pemancar dan penerima dengan memanfaatkan hibrida pola desain publikasi dari titik-ke-titik. Dalam penelitian ini, LoRa menjadi komponen utama untuk mengirimkan data. Aliran data dalam perangkat ini adalah *transmitter* 2,4 Ghz, *receiver* 2,4 Ghz, *transmitter* 433MHz, *receiver* 433 MHz, dan kontrol terbang. Perangkat yang diusulkan dalam jurnal ini memiliki jangkauan hingga 10 Km tanpa kehilangan koneksi, hal

tersebut membuktikan bahwa setiap modul bergantung pada pita frekuensi radio yang digunakan dalam jarak jauh sekalipun. Kesimpulan yang didapatkan dari makalah ini adalah pita frekuensi radio yang rendah akan menjangkau komunikasi yang lebih jauh.

2.2 Penggunaan Frekuensi 433 MHz Pada *Telemetry* UAV

Pengujian pada UAV telah dilakukan oleh Santos *et al.* [12] dan mendapatkan hasil bahwa frekuensi 915 MHz memiliki *path loss* yang lebih tinggi sehingga sinyal yang dihasilkan oleh frekuensi 433 MHz lebih stabil. Pengujian dilakukan pada pemukiman warga dengan kepadatan yang standar dengan frekuensi 433 MHz menduduki puncak grafik hasil. Peraturan yang membahas tentang penggunaan izin pita radio diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 80 Tahun 2015, dimana frekuensi 915 MHz termasuk ke dalam pita frekuensi radio 900 MHz. Rentang frekuensi radio 890 MHz - 915 MHz biasa digunakan dalam teknologi LoRa tetapi penggunaannya harus diawasi karena dapat mengganggu sistem komunikasi lain. Bahkan penggunaannya dikenakan Biaya Hak Penggunaan Izin Pita Frekuensi Radio (BHPIPR) oleh negara.

2.3 Aplikasi Telemetri 433 MHz Pada UAV AMES

Telemetri merupakan salah satu teknologi yang dapat melakukan komunikasi data secara otomatis baik dari pengendali ke lokasi yang dituju maupun sebaliknya. Salah satu metode komunikasi yang digunakan adalah radio. Aplikasi telemetri dapat kita temui dalam berbagai bidang contohnya prakiraan cuaca, pemantauan kualitas air, dan pemantauan kondisi pasien oleh dokter dalam jarak jauh. Salah satu contoh penerapan telemetri adalah menggunakan perancangan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau *drone* menggunakan telemetri 433MHz untuk mengantarkan *survival kits* ke 4 tempat yang berbeda sebagai alternatif akomodasi logistik korban bencana alam [13]. Aplikasi telemetri 433 MHz pada *Aerial Measurement Eddy covariance System (AMES)* bertujuan untuk mengumpulkan data atmosfer.

2.4 Tantangan Dalam Implementasi *Telemetry* 433 MHz Pada UAV AMES

Beberapa tantangan yang mungkin akan dihadapi dalam implementasi telemetri 433 MHz pada *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) *Aerial Measurement Eddy covariance System* (AMES) adalah jarak pengirimannya yang jauh. Meskipun frekuensi 433 MHz telah terbukti memiliki *path loss* yang kecil tetapi tidak menutup kemungkinan bahwa jarak yang jauh bisa menghambat sinyal akibat hambatan fisik seperti pepohonan dan struktur dataran yang tidak rata. Penelitian [12] yang dilakukan pada kepadatan penduduk yang sedang mengakibatkan pengiriman sinyal yang tidak maksimal, sama halnya dengan daerah yang padat dengan elektronik lain dengan frekuensi yang sama sehingga dapat menghambat komunikasi sinyal.

2.5 Chip Modul Radio *Long Range* (LoRa)

Chip LoRa yang digunakan dalam penelitian ini adalah IC SX1268 yang merupakan chip *transceiver* yang mengandalkan teknologi *Long Range* (LoRa) atau teknik modulasi *spread spectrum Chirp Spread Spectrum* (CSS). *Chirp Spread Spectrum* adalah *spread spectrum* yang mengandalkan pulsa kicau atau *chirp* termodulasi frekuensi *linier wideband*. Sesuai dengan namanya, modul ini menghubungkan setiap bit dari informasi *payload* dengan informasi *chirp*. SX1268 memiliki sensitivitas penerimaan yang tinggi -148 dBm dan daya transmisi +22 dBm yang memungkinkan penerimaan sinyal yang bisa dikatakan sangat lemah. Sensitivitas tersebut yang menjadikan *transceiver* ini berada pada pilihan utama untuk aplikasi dengan jangkauan yang luas.

Modul SX1268 dapat beroperasi pada frekuensi sebesar 410 MHz sampai dengan 493 MHz. Keunggulan dari SX1268 ini yaitu anti-interferensi, anti hambatan, dan dapat menghemat konsumsi daya yaitu hanya sebesar 4,2 mA [14]. SX1268 yang digunakan diproduksi oleh perusahaan bernama *SEMTECH* yang bergerak dibidang teknologi. IC SX1268 digunakan karena konsumsi daya yang sangat rendah dibandingkan dengan SX1278 yang membutuhkan daya tinggi. Selain itu, SX1268 juga memiliki kecepatan pengiriman data yang lebih tinggi yaitu 300 Bps – 62,5 kbps dibandingkan dengan IC SX1278 yang hanya 300 bBs – 37,5 kbps.



Gambar 2.1 *Package Marking* [15].

Spesifikasi dari SX1268 sebagai berikut:

Tabel 2.1 Spesifikasi SX1268

Spesifikasi	Perincian
Tipe Modul	<i>Transceiver RF Sub-GHz</i>
Frekuensi Operasi	410 MHz-810MHz
Daya transisi maksimum	+22 dBm dengan baterai +14 dBm dengan konverter DC-DC/Catu Daya
Konsumsi daya listrik	< 4,2 mA saat menerima dan 22 mA saat mengirim
Sensitivitas	Hingga -148 dBm
Jarak koneksi	7 km
Konektor	IPEX/lubang stempel untuk antena

2.6 *Microcontroller Unit (MCU)*

Microcontroller yang digunakan dalam penelitian ini adalah ESP32 yang merupakan modul yang menggabungkan Wi-Fi dan Bluetooth pada frekuensi 2,4 GHz dalam chip tunggal yang dirancang dengan teknologi *Taiwan Semiconductor Manufacturing Company* (TSMC) dengan ukuran semikonduktor yang kecil yaitu 40 nm. Modul ini dirancang untuk mencapai kekuatan dan performa *Radio Frequency* (RF) yang unggul diantaranya ketahanan, multifungsi, dan keandalan dalam berbagai aplikasi dan skenario daya. ESP32 dirancang untuk penggunaan dalam perangkat aplikasi, perangkat elektronik yang dapat dipakai, dan *Internet of Things* (IoT) [12]. Penggunaan mikrokontroler ESP32 didasarkan pada

kemudahan dalam penggunaan seperti dapat diintegrasikan dengan LoRa beserta *library* yang lengkap, RAM yang lebih besar, dan harga yang terjangkau dibandingkan dengan STM32. Tetapi, ESP32 ini hanya memiliki konektor micro USB sehingga jika ingin menggunakan *port Type-C* dibutuhkan konverter USB atau pengembangan lebih lanjut.



Gambar 2.2 ESP32 WROOM 32E [16].

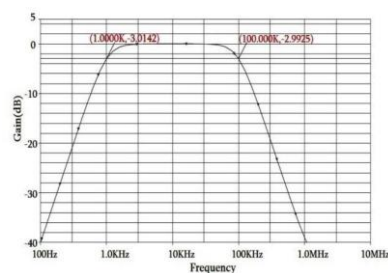
Gambar 2.3 merupakan tampak dari ESP32 WROOM 32E, dimana tidak seperti esp32 yang sudah dalam bentuk modul, ESP32 WROOM 32E terdiri dari sebuah chip dengan dengan *bluetooth*, wi-fi, dan juga *crystal oscylator* dan belum termasuk rangkaian regulator, konektor USB untuk menyambung ke komputer dan komponen pendukung lainnya. ESP32 jenis ini cocok digunakan untuk pembuatan sistem dengan penyesuaian berdasarkan fungsinya, contohnya pada penelitian ini digunakan sebagai kontroler pada sistem telemetri. Dalam penelitian ini, modul tersebut digunakan sebagai mikrokontroler utama sistem telemetri LoRa 433 MHz, berperan mengatur komunikasi data antara sensor pada UAV dan *Ground Control Station* melalui protokol *MAVLink*, sekaligus mengendalikan *input-output digital*, *serial*, dan SPI. Dengan karakteristik tersebut, ESP32-WROOM-32E menjadi inti pemrosesan yang efisien, ringkas, dan mudah diintegrasikan ke dalam desain PCB telemetri yang disesuaikan dengan kebutuhan sistem. [17].

Tabel 2. 2 Spesifikasi ESP32 Wroom

Spesifikasi	Perincian
Chip	ESP32-D0WDQ6
MCU	Tensilica Xtensa LX6 32-bit Dual-Core di 160/240 MHz
Prosesor	TSMC 40 nm
Tegangan Operasional	3,0 V - 3.6 V
Tegangan Output	3,3 V dan 5 V
RAM/Memori Flash	520KB / 4MB
Pin GPIO	32 Pin
Pin SPI	4
Pin I2C	2
Pin PWM	8

2.7 Metode Penapisan Sinyal

Metode yang digunakan dalam sistem penapisan atau penyaringan sinyal adalah dengan menggunakan metode *Band Pass Filter* (BPF). Metode BPF ini bekerja dengan menghalau sinyal dengan frekuensi yang lebih rendah dan lebih tinggi dari frekuensi yang ditentukan, *band-pass filter* adalah sebuah rangkaian filter yang memberikan *output* konstan jika frekuensi *input* berada dalam *range* frekuensi kerja dari filter atau di antara frekuensi *cut-off* atas dan frekuensi *cut-off* bawah. *Band pass filter* terdiri dari *high pass filter* yang diseri dengan *low pass filter* [13]. *Band pass* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *band pass* yang memiliki kemampuan untuk mem-filter frekuensi dibawah atau diatas 433 MHz. Grafik *Band Pass Filter* dapat dilihat papa gambar 2.4 dibawah.



Gambar 2.3 Ilustrasi Band Pass Filter [18].

Pada gambar 2.4 diperlihatkan grafik dari hasil penyaringan sinyal dengan *band pass filter*. Pada grafik dapat dilihat pada bagian awal atau frekuensi bawah dan juga pada bagian akhir atau frekuensi atas sinyal terdapat *cut-off* dimana pada frekuensi ini sinyal akan diredam ditunjukkan dengan grafik yang menurun menuju nol. Sedangkan pada bagian tengah grafik meningkat ke puncak menandakan sinyal yang diloloskan oleh rangkaian *band pass filter* ini. Frekuensi tengah atau frekuensi resonansi (f_0) ditentukan oleh keseimbangan antara reaktansi induktif dan kapasitif dalam rangkaian tangki LC. Hubungan dasar resonansi dirumuskan sebagai

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{eff}} C_{\text{eff}}}}$$

di mana L_{eff} dan C_{eff} merupakan nilai induktansi dan kapasitansi efektif dari rangkaian. Nilai efektif ini tidak hanya berasal dari komponen ideal, tetapi juga mencakup pengaruh kapasitansi parasitik yang muncul akibat tata letak PCB dan karakteristik fisik komponen [19].

Menurut Alavi Lavasani dan Medi, setiap induktor fisik memiliki kapasitansi parasitik (C_p) yang menyebabkan terbentuknya *Self-Resonant Frequency* (SRF). Hubungan antara SRF, L, dan C_p dinyatakan sebagai

$$\text{SRF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C_p}}, C_p = \frac{1}{(2\pi \text{SRF})^2 L}$$

Nilai SRF diperoleh dari datasheet pabrikan induktor, yang umumnya berada pada kisaran 0,6 – 1,2 GHz untuk induktor RF 15 nH. Kapasitansi parasitik C_p hasil perhitungan SRF kemudian ditambahkan ke dalam total kapasitansi tangki LC. Dalam konfigurasi BPF yang digunakan, dua kapasitor *shunt* ke *ground* (C_2 dan C_3) serta satu kapasitor antar-*node* (C_1) digabungkan membentuk kapasitansi total antar *node* dengan persamaan

$$C_{23} = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}$$

Total kapasitansi efektif yang memperhitungkan efek parasitik dapat dinyatakan sebagai

$$C_{\text{eff}} = C_2 + C_{23} + C_{L,\text{par}} + C_{\text{pad,seri}}$$

dengan

$$C_{L,\text{par}} = \frac{1}{(2\pi f_{\text{SRF}})^2 L}$$

Persamaan-persamaan di atas menunjukkan bahwa frekuensi resonansi efektif akan bergeser menurun seiring bertambahnya kapasitansi parasitik — hal ini sesuai dengan model *total-C* diferensial/komon [20]

Batas bawah dan batas atas pita transmisi filter ditentukan oleh frekuensi *cut-off* bawah (f_L) dan frekuensi *cut-off* atas (f_H), yaitu frekuensi di mana amplitudo sinyal keluaran menurun sebesar 3 dB dari nilai puncak. Kondisi tersebut memenuhi

$$|H(f_{L,H})| = \frac{|H_{\text{max}}|}{\sqrt{2}}$$

Selisih antara kedua frekuensi *cut-off* tersebut merupakan *bandwidth* (BW), sedangkan rasio antara frekuensi tengah dan lebar pita menghasilkan faktor kualitas (Q) yang dinyatakan sebagai

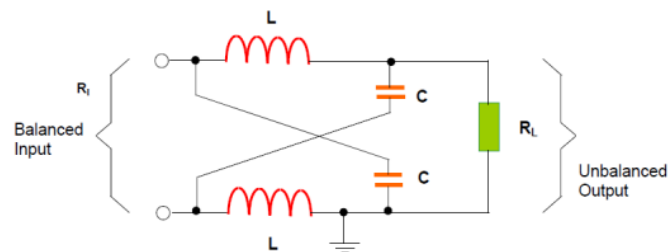
$$BW = f_H - f_L, Q = \frac{f_0}{BW}$$

Menurut Barik et al. (2021), titik -3 dB dipilih karena secara teoritis mewakili kondisi di mana daya keluaran berkurang hingga 50 % dari maksimum, sehingga menjadi batas praktis antara pita lolos (*passband*) dan pita tahan (*stopband*) [21].

2.8 Kesesuaian Impedansi Sistem

Kesesuaian Impedansi Sistem atau *Matching Impedansi* atau juga disebut rangkaian *Balanced-to-Unbalanced* (Balun) adalah perangkat listrik yang menghubungkan antara sinyal yang seimbang dan sinyal tidak seimbang, umumnya digunakan pada amplifier, antena, dan lain-lain. Komponen ini dapat

mengubah impedansi sinyal input yang tidak seimbang menjadi sinyal output yang seimbang dan sebaliknya. Sebuah balun memiliki beragam bentuk tergantung kebutuhan dan mungkin termasuk perangkat yang juga mengubah impedansi tetapi tidak perlu melakukannya [22]. Pada penelitian ini menggunakan komponen induktor dan juga kapasitor untuk menyusun rangkain balun, nilai dari setiap komponen ditentukan dengan menggunakan simulasi yang dilakukan dengan menggunakan program simulasi *Smith Chart*.



Gambar 2.4 Contoh *Schematic balance-unbalance* (balun) tipe L-C [23].

Gambar 2.4 adalah contoh rangkaian kesesuaian impedansi sistem atau *matching impedance* dengan tipe L-C. Pada rangkaian terdiri dari 2 buah induktor yang tersusun paralel yang dihubungkan secara seri dengan sebuah kapasitor dan sebuah induktor kemudian dihubungkan dengan konektor menuju ke antena.

2.9 Propagation Model

Bagi perancang sistem komunikasi radio, penting untuk dapat memprediksi *pathloss* propagasi gelombang radio, yang didefinisikan sebagai selisih antara daya yang dipancarkan dan daya yang diterima di tujuan. Dengan menggunakan informasi *pathloss*, perancang dapat mengoptimalkan sistem dan memastikan jangkauan radio yang memadai [24].

Dalam penelitian ini digunakan dua jenis model propagasi, yaitu *Free Space Path Loss* (FSPL) dan *Two-Ray Multipath Model*. Kedua model ini dipilih karena masing-masing mewakili kondisi propagasi yang berbeda, mulai dari ruang bebas ideal hingga adanya pengaruh pantulan dari permukaan tanah.

Free Space Path Loss (FSPL) adalah model propagasi gelombang elektromagnetik yang digunakan untuk menganalisis bagaimana sinyal merambat

dalam ruang bebas tanpa adanya hambatan seperti bangunan, pohon, atau gangguan lainnya. Model ini mengasumsikan bahwa gelombang menyebar secara isotropik (merata ke segala arah) dari pemancar ke penerima, dan hanya mengalami redaman karena penyebaran di ruang bebas (*Free Space Path Loss*, FSPL)[24], [25]. *Free Space Model* banyak digunakan dalam perhitungan jangkauan sinyal pada sistem komunikasi nirkabel seperti LoRa, WiFi, satelit, dan radar.

Friis Transmission Equation, Rumus Friis digunakan untuk menghitung daya yang diterima oleh antenna penerima dalam kondisi ruang bebas.

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_t G_r$$

dengan :

P_r = daya yang diterima (dBm)

P_t = daya pancar (dBm)

G_t, G_r = gain antenna pada pemancar dan penerima (dB)

λ = panjang gelombang (m), dengan $\lambda = \frac{c}{f}$

r = jarak komunikasi antar tx & rx (m)

c = kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)

f = frekuensi (Hz)

Sementara itu, pada kondisi nyata gelombang radio sering kali tidak hanya merambat melalui jalur langsung, tetapi juga melalui lintasan pantulan dari permukaan tanah. Hal ini dijelaskan dalam *Two-Ray Multipath Model* atau *Plane Earth Model* pada buku. Buku tersebut memperhitungkan adanya interferensi antara sinyal lintasan langsung dan lintasan pantulan. Akibat interaksi ini, karakteristik redaman sinyal menjadi berbeda dibandingkan model ruang bebas. Pada jarak tertentu, pelemahan sinyal berbanding dengan 20 dB per dekade, namun setelah melampaui jarak kritis, pelemahan meningkat menjadi 40 dB per dekade karena adanya interferensi destruktif [24], [26]. Hubungan daya terima terhadap jarak, tinggi antenna pemancar, dan tinggi antenna penerima dalam model ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_r = P_t \left(\frac{h_1 h_2}{d^2} \right)^2$$

atau dalam bentuk *pathloss* :

$$L_p = 40 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(h_1 h_2) \text{ dB}$$

dengan :

P_r = daya yang diterima (dBm)

P_t = daya pancar (dBm)

$d = r$ = jarak komunikasi antar tx & rx (m)

h_1 = tinggi antena pemancar (m)

h_2 = tinggi antena penerima (m)

Jarak peralihan dari model ruang bebas menuju model *two-ray* dikenal sebagai jarak kritis atau *first Fresnel zone distance* yaitu jarak di mana perbedaan lintasan antara gelombang langsung dan gelombang pantulan dari tanah sama dengan setengah panjang gelombang ($\lambda/2$) [26], [27]. Pada jarak ini kedua sinyal berada dalam kondisi saling berlawanan fasa (180°), sehingga terjadi interferensi destruktif yang kuat. Jarak kritis didefinisikan sebagai:

$$d_f = \frac{4h_1 h_2}{\lambda}$$

dengan :

d_f = jarak kritis (m)

h_1 = tinggi antena pemancar (m)

h_2 = tinggi antena penerima (m)

λ = panjang gelombang (m), dengan $\lambda = \frac{c}{f}$

Dengan demikian, ketika jarak komunikasi lebih kecil dari d_f , perhitungan *pathloss* lebih tepat menggunakan *Free Space Model* (FSPL) karena pengaruh pantulan tanah masih dapat diabaikan. Sebaliknya, ketika jarak komunikasi lebih besar dari d_f , maka *Two-Ray Multipath Model* lebih sesuai digunakan karena pantulan tanah sudah berperan dominan dalam memengaruhi kualitas sinyal.

2.10 Link Budget

Link budget merupakan metode perhitungan daya sinyal pada sistem komunikasi radio yang memperhitungkan seluruh faktor penguat (*gain*) dan pelemahan (*loss*) sejak pemancar hingga penerima. Melalui analisis ini, dapat diperkirakan besarnya daya terima pada sisi penerima dan dievaluasi apakah sistem memiliki margin yang cukup untuk menjamin keberlangsungan komunikasi [25], [26]. Secara umum, daya terima dalam satuan dBm dapat dirumuskan sebagai:

$$P_r [\text{dBm}] = P_t + G_t + G_r - L_{tx} - L_{rx} - L_{\text{path}} - M_f,$$

dengan :

P_r = daya terima pada penerima (dBm)

P_t = daya pancar pemancar (dBm)

G_t = gain antenna pemancar (dBi)

G_r = gain antenna penerima (dBi)

L_{tx} = rugi-rugi kabel/konektor sisi pemancar (dB)

L_{rx} = rugi-rugi kabel/konektor sisi penerima (dB)

L_{path} = rugi jalur propagasi (dB)

M_f = margin fading Rician (dB)

Dalam konteks kanal *Rician*, karakter *fading* digambarkan oleh *K-factor*, yaitu rasio antara daya komponen *line-of-sight* (LOS) dengan daya komponen *multipath*. Nilai K yang besar menunjukkan kanal dominan LOS, sedangkan nilai K kecil mendekati karakteristik *multipath Rayleigh*. Menurut Aoki dan Honda, nilai *K-factor* sangat bergantung pada geometri hubungan udara-ke-daratan (*air-to-ground*) serta ketinggian penerbangan UAV, di mana pada ketinggian rendah kanal cenderung menunjukkan karakteristik *Rician-like* dengan rentang $K \approx 4 - 8$ dB akibat pantulan permukaan tanah dan vegetasi [27].

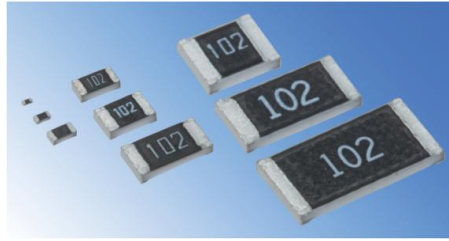
Pengaruh fading rician terhadap reliabilitas sistem komunikasi dapat dianalisis menggunakan pendekatan statistik berbasis fungsi *Marcum-Q*, di mana probabilitas *outage* diperoleh dari fungsi distribusi kumulatif rician (CDF). Pendekatan ini juga diterapkan oleh Abraham et al, yang memanfaatkan *complementary Marcum-Q function* untuk merepresentasikan probabilitas

gangguan pada kondisi kanal dengan reliabilitas sangat tinggi (*ultra-reliable regime*) [28]. Pendekatan ini memungkinkan perhitungan *fade margin* secara statistik berdasarkan target keandalan tertentu, bukan sekadar koreksi rata-rata.

Untuk menjamin reliabilitas sistem, *fade margin* dihitung dari distribusi probabilitas sinyal yang mengalami *fading* dengan mempertimbangkan nilai K yang sesuai dengan kondisi kanal. Pada penelitian ini digunakan target 99 % *availability*, yang berarti probabilitas *outage* maksimum sebesar 1 %, sesuai dengan konsep *ultra-reliable link* yang umum diterapkan pada komunikasi nirkabel modern [29]. Dengan memasukkan parameter $K = 6$ dB, yang merepresentasikan kondisi *Random-LOS* sesuai lingkungan pengukuran, hasil estimasi menunjukkan bahwa diperlukan *fade margin* sekitar 11–12 dB untuk mencapai reliabilitas tersebut. Nilai margin ini sejalan dengan hasil simulasi kanal Rician pada penelitian Traßl et al., yang menunjukkan bahwa pada rentang $K = 5$ –10 dB dibutuhkan *fade margin* sekitar 10 dB untuk menjaga *outage probability* di bawah 1 % [30]. Dengan demikian, komponen M_f dalam perhitungan *link budget* diisi dengan nilai *fade margin* ini sehingga daya terima yang diprediksi menjadi lebih realistis, sekaligus memastikan desain sistem mampu mempertahankan kontinuitas komunikasi UAV–GCS pada kondisi lapangan yang mengalami fluktuasi kanal akibat *multipath* dan difraksi [31].

2.11 Penyesuaian RLC dan Penapis Sinyal pada *Transceiver*

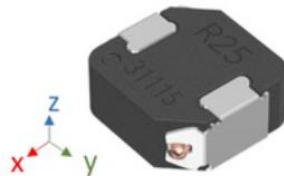
Pada sistem *Penyesuaian RLC dan Penapis Sinyal pada Transceiver* diperlukan komponen-komponen seperti resistor, induktor, dan juga kapasitor, komponen yang digunakan berjenis *Surface Mount Device* (SMD). SMD Resistor adalah komponen berbentuk segi empat kecil dengan area *metalized* di kedua ujungnya yang dapat disolder dengan papan PCB. SMD resistor memiliki substrat keramik untuk film oksida logam disimpan. Resistor digunakan untuk mengurangi atau membagi tegangan dan menciptakan aliran arus yang stabil pada rangkaian [32]. SMD resistor biasanya ditandai dengan tiga sampai empat digit angka atau kombinasi satu huruf dan dua digit angka.



Gambar 2.5 SMD Resistor [32].

Gambar 2.5 merupakan Resistor SMD dengan kode 4 digit dibaca dengan dua angka pertama menunjukkan nilai signifikan, angka ketiga sebagai pengali dalam bentuk pangkat 10, dan angka keempat menunjukkan toleransi. Sebagai contoh, kode "1206" berarti 12 (dua angka pertama) dikalikan 10^0 (angka ketiga), sehingga nilainya adalah 12Ω dengan toleransi 1% (angka keempat).

SMD Induktor dihasilkan dari memutar kawat konduktor pada basis konduktor yang buruk. Basis kumparan tersebut disebut dengan inti. *Coil* sudah lama dikenal sebagai induktor. Sebuah gulungan selalu menolak variasi arus, jika ada suplai variabel yang diberikan ke setiap kumparan, tegangan polaritas berlawanan dihasilkan dalam kumparan yang memiliki sifat sebagai induktansi. Penurunan arus dapat disebabkan oleh peningkatan impedansi pada induktor [33].



Gambar 2.6 SMD Inductor [34].

Gambar 2.6 menunjukkan induktor SMD, Induktor SMD memiliki kode angka atau huruf untuk menunjukkan nilai induktansi, biasanya dalam *mikrohenri* (μH). Pada kode tiga digit, dua angka pertama adalah nilai signifikan, dan angka ketiga merupakan pengali dalam bentuk pangkat 10. Sebagai contoh, kode "221" berarti 22×10^1 , menghasilkan nilai induktansi $220 \mu\text{H}$. Beberapa induktor juga mencantumkan huruf yang menunjukkan toleransi atau spesifikasi khusus. Pembacaan nilai ini penting untuk memastikan komponen sesuai dengan kebutuhan rangkaian.

Kapasitor merupakan komponen elektronik yang tersusun dari isolator yang berada diantara dua konduktor. Fungsi utama dari kapasitor adalah untuk menyimpan energi listrik dan menggunakannya saat dibutuhkan. Selain itu, kapasitor dapat mengatur tegangan agar tetap stabil dan menyaring frekuensi dari sinyal yang tidak termasuk kedalam rentang yang dicari. Pada penelitian kali ini, kapasitor memiliki peran penting sebagai komponen pendukung [32].



Gambar 2. 7 SMD Capacitor [35].

Gambar 2.7 menunjukkan gambar dari kapasitor SMD, pada kapasitor smd biasanya tidak terdapat kode angka seperti pada resistor atau induktor. Untuk mengetahui nilainya dapat diketahui dengan melihat *datasheet* saat membelinya atau dengan menggunakan alat ukur kapasitansi seperti *multimeter*.

2.12 Pengaturan *Time-Stamp*

Pada modul telemetri diperlukan sebuah komponen untuk mengatur *time-stamp*. Dalam sebuah telemetri, *time-stamp* adalah penanda waktu yang digunakan untuk mencatat waktu pengiriman dan juga penerimaan dalam sistem telemetri. Komponen yang digunakan sebagai pengatur *time-stamp* adalah kristal osilator yang merupakan suatu komponen yang berfungsi untuk menstabilkan frekuensi sinyal secara akurat. Kristal osilator ini tersusun dari material *quartz* atau *Rochelle salt* dengan kualitas terbaik sehingga memiliki kemampuan *piezoelectric effect*. Kemampuan tersebut yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik ataupun sebaliknya. Penggunaan kristal osilator dapat meningkatkan referensi *clock* yang tinggi [36].



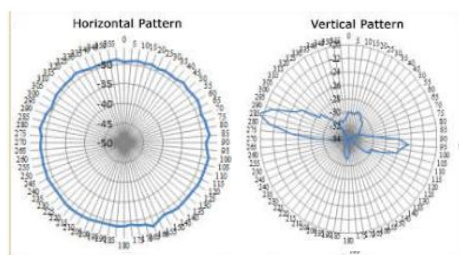
Gambar 2.8 Crystal Oscillator [37].

Gambar 2.8 adalah tampak dari kompone *Crystal Oscillator* yang biasanya terdapat pada mikrokontroller, jam, modul radio, komputer dan perangkat elektronik lainnya yang membutuhkan pencatatan waktu yang akurasi dalam sistemnya.

2.13 Antena

Antena adalah penghubung antara gelombang radio yang merambat melalui ruang dan arus listrik yang bergerak dalam konduktor logam, umumnya digunakan untuk mengirimkan informasi dengan mengolah sinyal melalui pemancar dan penerima [38]. Antena memancarkan gelombang elektromagnetik atau gelombang radio pada *receiver* untuk transmisi data. Saat penerimaan, antena menangkap gelombang radio untuk kemudian diperkuat oleh *receiver*. Bentuk antena sendiri beragam tergantung pola penyebaran, frekuensi, dan gain yang dibutuhkan. Penggunaan daya sebesar 33dBm (2 Watt) memiliki beberapa tantangan yaitu, meningkatkan konsumsi energi modul LoRa, interferensi elektromagnetik, dan manajemen panas.

Antena yang digunakan dalam penelitian ini salah satunya yaitu antena *monopole* berjenis *omnidirectional*. Antena *omnidirectional* dapat mendistribusi sinyal secara merata ke seluruh arah. Banyak tantangan yang melekat pada *Antenna Patch Mikrostip* (MPA) sehingga harus dikonfigurasi ulang karena berada di wilayah dengan standar regional [39]. Selain itu antena lain yang digunakan juga yaitu adalah antena telex. Antena telex biasanya dapat digunakan pada wilayah yang cukup jauh dan dapat digunakan di *outdoor*. Antena ini memiliki pola radiasi yang memecah ke segala arah sehingga ideal untuk pengiriman dan penerimaan sinyal dengan tempat yang berbeda. Antena biasanya memiliki pola radiasi tergantung dari jenis antena, pola radiasi dapat dilihat pada gambar 2.9



Gambar 2.9 Pola radiasi/daya antenna telex [40].

2.14 *Flight Controller Pixhawk*

Flight Controller adalah komponen utama pada sistem kendali penerbangan dari robot terbang, salah satu contohnya adalah pixhawk. Pixhawk adalah sistem kendali penerbangan dengan tipe *platform* terbuka yang mendukung banyak *firmware* seperti Arducopter dan PX4. Penggunaan *flight controller* pixhawk pada pengembangan drone menjadi semakin umum karena kemampuannya yang tinggi dalam mengelola stabilitas penerbangan secara otomatis [41]. Contoh penggunaan pixhawk pada sistem kendali UAV yaitu berfungsi sebagai pelindung tanaman sebagai objek, komunikasi antara sistem kendali penerbangan dan sistem penyiram telah direalisasikan untuk menyelesaikan fungsi dengan sukses [42].



Gambar 2. 10 *Flight Controller Pixhawk* [42]

Dalam konteks pengembangan UAV, pixhawk dapat dikolaborasikan dengan berbagai sensor (*accelerometer*, *gyroscope*, *barometer*, *magnetometer*, dan *GPS*). Dengan kemampuan dan stabilitas yang ditawarkan oleh pixhawk, sistem ini dapat menjadi pilihan utama bagi peneliti untuk mengembangkan UAV seperti pemantauan kualitas udara, pertanian, dan militer tanpa monitoring secara terus-menerus.

2.15 *Software Arduino IDE*

Arduino IDE merupakan perangkat lunak *open-source* yang berfungsi sebagai lingkungan pemrograman (*Integrated Development Environment*) untuk mengembangkan dan mengunggah kode ke papan mikrokontroler berbasis Arduino. Menurut Kamal et al, Arduino IDE berperan penting dalam proses pembelajaran sistem digital karena memungkinkan mahasiswa untuk merancang, mengedit, mensimulasikan, dan menguji rangkaian elektronika analog maupun

digital secara langsung melalui satu platform terpadu. Dalam penelitian tersebut, implementasi Arduino IDE pada perkuliahan Sistem Digital terbukti meningkatkan hasil belajar mahasiswa—pada kelas eksperimen tingkat ketuntasan meningkat hingga 74 %, dibandingkan 44 % pada kelas kontrol—menunjukkan efektivitas penggunaan perangkat lunak ini sebagai media pembelajara interaktif [43].

Arduino IDE juga dilengkapi pustaka (*library*) pemrograman berbasis C/C++ yang mempermudah pengolahan input dan output mikrokontroler. Melalui fitur ini, pengguna dapat memodelkan parameter rangkaian analog dan digital, menganalisis sifat rangkaian menggunakan simulasi AC/DC serta transien, dan melakukan pengujian sebelum perangkat keras direalisasikan. Lingkungan pemrograman ini bersifat lintas-*platform* dan menyediakan antarmuka sederhana yang mendukung kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengembangan proyek IoT serta otomasi.

2.16 *Software Proteus*

Proteus adalah *software* simulasi elektronik yang sangat populer digunakan dalam dunia pendidikan, penelitian, dan industri untuk keperluan desain sirkuit maupun simulasi mikrokontroler. Dalam satu paket, Proteus menawarkan dua modul utama, yaitu ISIS untuk pembuatan skematik rangkaian elektronik serta ARES untuk desain layout PCB. Kelebihan utama Proteus adalah kemampuannya menghubungkan antara rangkaian digital dan analog dalam simulasi yang sama, sehingga dapat menguji pemrograman mikrokontroler beserta peralatan eksternal dalam proses perancangan [44].

Saat ini proteus sangat diskriptif digunakan untuk mensimulasikan sistem otomatis seperti kontrol lampu taman, pengontrol suhu, hingga aplikasi pada sistem monitoring. Kemampuan Proteus dalam melihat dan mengatasi kemungkinan kesalahan dalam desain sebelum melakukan cetak PCB menjadikan proses desain lebih efisien, menghemat biaya dan waktu . Banyak penelitian menyarankan penggunaan Proteus sebagai media pembelajaran karena fiturnya yang lengkap dan *user-friendly* [45].

2.17 *Software Smith v4.1*

Smith v4.1 merupakan *software* visualisasi berbasis Windows yang khusus digunakan untuk analisis dan visualisasi *Smith Chart*, alat penting dalam analisa impedansi rangkaian RF (*radio frequency*). Smith v4.1 banyak digunakan *engineer* dan peneliti dalam mendesain sirkuit pencocokan impedansi, khususnya dalam pengujian *L-match*, di mana proses koreksi impedansi kompleks sangat krusial untuk efisiensi transfer daya di sistem RF. Kelebihan dari Smith v4.1 adalah kemudahan input parameter, hasil visual yang interaktif, dan kemampuan menghitung perubahan impedansi secara dinamis.

Dengan menghadirkan tampilan *real-time* atas perubahan yang dilakukan, pengguna dapat dengan mudah menyesuaikan komponen dalam pencocokan impedansi, sehingga optimalisasi rangkaian RF menjadi lebih efisien dan akurat. Smith v4.1 kerap digunakan dalam riset serta pengembangan perangkat komunikasi nirkabel dan *antenna matching* [46].

2.18 *Software EasyEDA PCB Design*

EasyEDA adalah *software Electronic Design Automation* (EDA) berbasis web yang memfasilitasi desain, simulasi, dan pembuatan PCB secara *cloud-based* maupun *offline*. Kelebihan utama EasyEDA terletak pada kemudahan kolaborasi tim, integrasi dengan sistem ERP/PLM, serta ketersediaan pustaka komponen yang sangat lengkap. EasyEDA juga mendukung simulasi SPICE, editing skematik, serta *output* file produksi seperti *Gerber*, *Bill of Materials* (BOM), dan *pick and place list* dimana semuanya terintegrasi otomatis dalam *platform* [47].

EasyEDA sangat populer di kalangan maker maupun manufaktur PCB, terutama karena tidak memerlukan instalasi *software* (jalan di browser), serta mendukung proyek terbuka dan privat. Pada pembelajaran elektronik, EasyEDA mempercepat *workflow* mulai dari perancangan hingga produksi PCB, sekaligus memudahkan komunikasi dan revisi desain antar anggota tim.

2.19 *Soldering*

Soldering merupakan proses penyambungan komponen elektronik menggunakan bahan timah (*solder*) yang dilelehkan sehingga dapat menghubungkan kaki

komponen dengan jalur pada PCB. Tren industri saat ini mengarah pada soldering bebas timbal (*lead-free soldering*) karena alasan kesehatan dan lingkungan. Solder bebas timbal biasanya berbasis timah, perak, dan tembaga serta dikelompokkan berdasarkan suhu lelehnya (tinggi, sedang, rendah). Penggunaan soldering yang tepat sangat krusial untuk memastikan kekuatan, keandalan sambungan, serta performa perangkat elektronik .

Penelitian menunjukkan bahwa *joint* solder bebas timbal memiliki tingkat keandalan yang berbeda tergantung suhu dan teknik pemanasan yang digunakan. Pada manufaktur elektronik modern, soldering menjadi faktor utama dalam proses perakitan, serta memengaruhi siklus hidup produk dan tingkat kecacatan pada produksi. Kontrol kualitas pada proses soldering penting untuk mencegah kegagalan dini dan memastikan performa perangkat secara jangka panjang [48].

2.20 Hot Plate Soldering



Gambar 2. 11 Hot Plate Soldering

Gambar 2.11 merupakan penampakan dari *Hot plate* soldering adalah teknik soldering permukaan yang menggunakan pemanas berbentuk pelat datar untuk melelehkan solder *paste* pada komponen SMD (*surface mount device*). Keunggulan utama *hot plate soldering* adalah kemudahan, kecepatan proses, serta biaya rendah dibandingkan oven *reflow* yang konvensional. Pada teknik ini, pelat penghangat dipanaskan hingga suhu kerja (sekitar 220-240°C), PCB diletakkan di atasnya, sehingga solder *paste* meleleh dan mengikat komponen secara merata [49].

Hot Plate soldering banyak dipilih kalangan *maker* dan *prototyper* karena mudah dibuat sendiri dan cocok untuk produksi kecil dan menengah. Studi terbaru menunjukkan metode ini efektif dalam mempercepat pengerjaan tanpa perlu peralatan mahal, walaupun perlu perhatian khusus pada kontrol suhu dan waktu pemanasan untuk menghindari kerusakan komponen atau sambungan yang kurang sempurna. Keterbatasan utama teknik ini adalah hanya bisa digunakan untuk soldering satu sisi PCB dalam satu waktu [50].

2.21 RSSI

RSSI atau *Received Signal Strength Indicator* merupakan parameter penting dalam sistem komunikasi nirkabel untuk mengukur kekuatan sinyal yang diterima pada receiver. Nilai RSSI biasanya dinyatakan dalam satuan dBm (*decibel milliwatt*) dan menunjukkan seberapa kuat sinyal yang diterima dari sebuah *transmitter*. Pada aplikasi jaringan sensor nirkabel, seperti *ZigBee* dan *LoRa*, RSSI digunakan untuk estimasi jarak antara *node*, penilaian kondisi *link*, dan proses handover antar *access point*. RSSI sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti adanya halangan fisik, *multipath fading*, dan interferensi, sehingga nilainya dapat bervariasi meskipun pada jarak yang sama. Penelitian juga menjelaskan bahwa nilai RSSI sering kali digunakan sebagai dasar untuk pemodelan *path loss* dalam analisis performa sistem *wireless*, karena korelasinya dengan kualitas link serta kapasitas kanal komunikasi [51].

Metode pengukuran RSSI secara umum memanfaatkan persamaan logaritmik yang menghubungkan kekuatan sinyal transmisi terhadap jarak dan faktor lingkungan, sehingga dapat digunakan dalam proses trilaterasi untuk keperluan

indoor localization. Semakin dekat receiver dengan transmitter, nilai RSSI akan semakin besar (menuju 0 dBm), sedangkan semakin jauh akan semakin negatif hingga -120 dBm pada sejumlah modul *wireless*. Pengujian nilai RSSI pada sistem komunikasi berbasis LoRa menunjukkan sinyal mulai melemah drastis terutama setelah melewati rintangan seperti bangunan atau pohon. Dengan demikian, RSSI tidak hanya memiliki peran kritis dalam penetapan kualitas sinyal, tetapi juga untuk desain sistem komunikasi *wireless* berbasis sensor dan IoT modern [52].

2.22 SNR

SNR atau *Signal to Noise Ratio* adalah rasio antara daya sinyal yang diinginkan terhadap daya *noise* atau gangguan yang ada pada kanal komunikasi, dinyatakan dalam satuan desibel (dB). SNR menjadi indikator vital dalam menilai kualitas dan keandalan transmisi data pada sistem nirkabel maupun komunikasi optik serta akustik. Penelitian terbaru menyebutkan bahwa semakin tinggi nilai SNR, maka kualitas sinyal juga semakin baik karena *noise* yang berinterferensi terhadap sinyal utama semakin kecil. Sebaliknya, SNR yang rendah menyebabkan *error rate* meningkat dan menurunkan kehandalan sistem. Perhitungan SNR sering digunakan dalam optimasi jaringan *wireless* untuk mitigasi interferensi serta menentukan area efektif jangkauan sistem komunikasi [53].

Terdapat kaitan erat antara SNR, jarak, serta kondisi lingkungan. SNR cenderung menurun secara kuadratik saat *receiver* semakin jauh dari *transmitter* akibat kenaikan *noise* relatif terhadap sinyal. Pada penelitian tahun 2024 disebutkan bahwa upaya menjaga SNR tetap tinggi sangat penting untuk aplikasi telekomunikasi, transmisi data multimedia, hingga monitoring sensor nirkabel. Beberapa teknik seperti filter, penguatan sinyal, serta pemilihan kanal transmisi yang optimal banyak diadopsi untuk meningkatkan SNR di lingkungan dengan interferensi tinggi.

2.23 Modul Radio Terdahulu



Gambar 2.12 Modul Radio Terdahulu

Gambar 2.12 merupakan modul radio terdahulu dimana modul ini menggunakan chip radio SX1276. Modul radio ini hanya terdiri dari chip radio dan belum memiliki MCU sebagai kontroler sehingga untuk mengoperasikannya memerlukan *microcontroller* external seperti ESP8266 atau ESP32 yang dihubungkan dengan kabel. Untuk ukuran dari modul ini sendiri cukup besar dengan panjang 6,5 cm dan lebar 5,3 cm dan juga berat 16 gram, ukuran berat dan dimensi tersebut belum termasuk dengan *microcontrollernya* externalnya. Dengan tidak adanya kontroler dan juga dengan ukuran yang cukup besar membuat modul radio ini kurang cocok jika dijadikan radio telemetry untuk keperluan UAV yang memerlukan efisiensi ukuran dan juga berat.

BAB III

METODE PENELITIAN

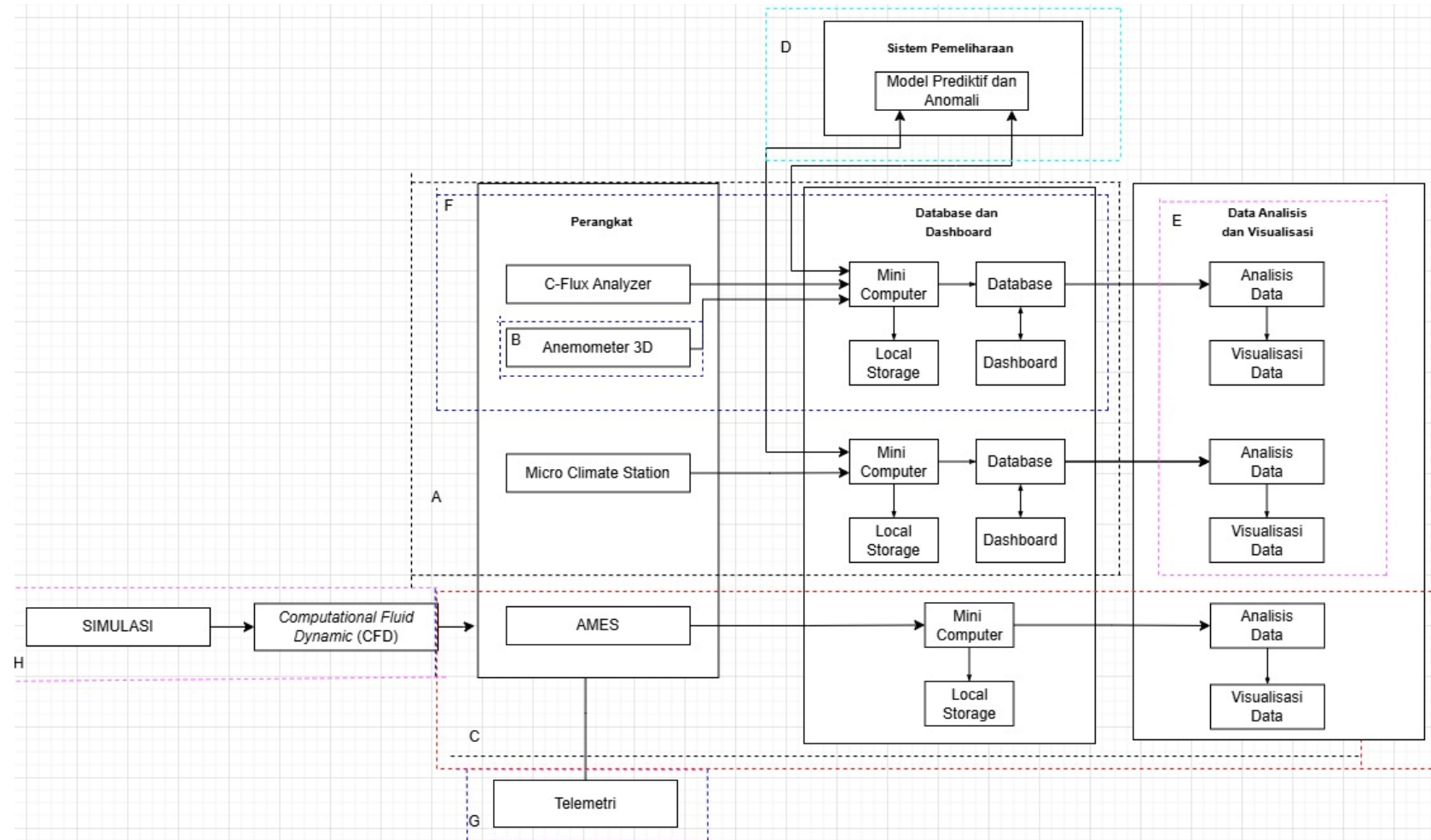
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari 2024 – Agustus 2025 di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro Universitas Lampung sebagai lokasi studi dan *development* serta pengujian statis dan juga di Kota Baru Lampung sampai ke Metro untuk komunikasi dinamis atau pengujian jarak.

3.2 Capstone Project

Proyek ini berfokus pada pengembangan dan implementasi modul telemetri untuk *Aerial Measurement Eddy Covariance System* (AMES) berbasis teknologi LoRa dengan frekuensi kerja 433 MHz. Dalam *capstone project* ini, peneliti bertanggung jawab pada aspek pengembangan sistem telemetri, mencakup desain, implementasi, dan pengujian komunikasi antara *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dengan *Ground Control Station* (GCS).

Tugas peneliti sendiri meliputi perancangan sistem komunikasi yang stabil dan andal menggunakan chip LoRa SX1268 dan mikrokontroler ESP32. Selanjutnya, peneliti merancang dan membuat modul *Printed Circuit Board* (PCB) untuk komunikasi radio dan mikrokontroler dengan memastikan kompatibilitas antar perangkat. Setelah itu, modul telemetri diintegrasikan dengan UAV serta perangkat lunak *Ground Control Station* seperti *Mission Planner* untuk mendukung pengendalian dan pemantauan data secara *real-time*. Proses ini diakhiri dengan pengujian fungsionalitas dan keandalan modul telemetri dalam berbagai kondisi lingkungan untuk memastikan performa sistem yang sesuai dengan spesifikasi.



Gambar 3.1 Pembagian *Capstone Project*

Gambar 3.1 menunjukan diagram pembagian *Capstone Project*, peneliti tergabung pada tim *Aerial Measurement Eddy Covariance System* (AMES) dan berfokus pada pengembangan *telemetry*. Selain itu berdasarkan diagram, AMES sendiri tergabung dalam sebuah sistem dengan *Micro Climate Station* dan juga *Eddy Covarian System* (ECS) yang terintegrasi dalam satu kesatuan sistem.

3.3 Alat dan Bahan

Dalam Penelitian ini, terdapat beberapa alat dan juga bahan yang digunakan sebagai penunjang pada penelitian ini seperti yang dijelaskan pada tabel 3.1 dan tabel 3.2 berikut :

Tabel 3.1 Komponen yang digunakan

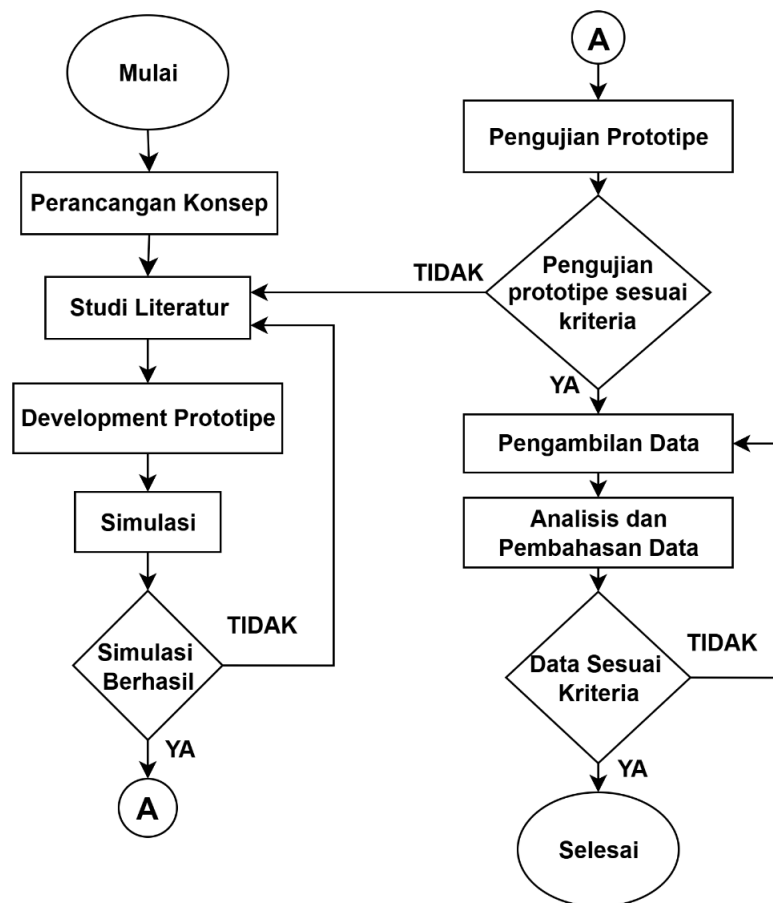
No.	Komponen	Keterangan
1.	Laptop	Sebagai GCS dan juga sebagai alat untuk pemrograman <i>telemetry</i>
2.	IC SX1628	Merupakan chip radio LoRa untuk komunikasi rf
3.	IC MAX2040	Merupakan chip <i>Low Noise Amplifier</i> (LNA) yang digunakan untuk menguatkan sinyal radio tanpa menguatkan <i>noise</i>
4.	IC PE4259	Merupakan Chip <i>Switching</i> pada transmisi radio, digunakan untuk <i>switching</i> antara jalur <i>receiver</i> dan juga jalur <i>transmitter</i> pada <i>Telemetry</i>
5.	IC AMS1117	Merupakan chip <i>regulator</i> yang digunakan untuk menurunkan tegangan listrik untuk digunakan pada komponen yang membutuhkan listrik dengan tegangan listrik kecil
6.	IC CP2102N	Merupakan chip yang digunakan untuk <i>converter</i> antara komunikasi serial ke <i>Universal Serial Bus</i> (USB) atau sebaliknya agar laptop dapat berkomunikasi dengan mikrokontroler (ESP 32)
7.	ESP32	Merupakan <i>Microcontroller</i> sebagai pusat kontrol dari <i>telemetry</i>

8.	<i>Resistor SMD</i>	Sebagai komponen pendukung rangkaian yang berfungsi menghambat arus Listrik
9.	<i>Capacitor SMD</i>	Sebagai komponen pendukung rangkaian yang berfungsi menyimpan sementara muatan listrik
10.	<i>Inductor SMD</i>	Sebagai komponen pendukung rangkaian yang berfungsi menyimpan sementara muatan listrik dalam bentuk medan magnet
11.	LED	Merupakan sebuah lampu yang digunakan sebagai indicator pada modul <i>telemetry</i>
12.	Dioda	Merupakan komponen pendukung yang berguna sebagai penyearah arus listrik
13.	Crystal Oscillator	Merupakan komponen yang digunakan untuk pengaturan waktu (<i>time-stamp</i>)
14.	Tombol / <i>Button</i>	Merupakan komponen yang dapat menyambungkan arus listrik ketika ditekan
15.	Konektor	Merupakan komponen yang berfungsi sebagai penghubung jalur transmisi atau jalur listrik antara PCB dengan kabel untuk dihubungkan dengan perangkat lain sebagai contohnya untuk menghubungkan modul <i>telemetry</i> dan laptop dengan kabel melalui konektor USB
16.	Antena	Berfungsi untuk mengubah sinyal listrik dari modul telemetri menjadi gelombang elektromagnetik dan sebaliknya
17.	<i>Solder Iron</i>	Berfungsi untuk menyolder komponen yang ukurannya besar dan mengoreksi hasil solderan <i>Hot Plate Soldering</i> .
18.	<i>Hot Plate Soldering</i>	Berfungsi untuk menyolder komponen sekaligus dalam sebuah pcb dengan bantalan pemanas.
19.	<i>Solder Paste</i>	Sebagai bahan perekat komponen dengan pcb (timah dalam bentuk pasta)
20.	<i>Solder Stencil</i>	Sebagai cetakan <i>Solder Paste</i> hanya mengenai tepat pada setiap kaki-kaki dari komponen.

Tabel 3.2 Komponen Software

No.	Komponen <i>Software</i>	Keterangan
1.	Arduino IDE	Sebagai <i>software</i> untuk menulis kode sensor pada mikrokontroller
2.	Mission Planner	Sebagai <i>software</i> untuk <i>Ground Station Control</i> (GCS)
3.	Easy EDA	Sebagai <i>software</i> untuk mendesain PCB
4.	Proteus	Sebagai <i>software</i> untuk simulasi <i>Band Pass Filter</i>
5.	Smith V4.1	Sebagai Software untuk simulasi Penyesuaian Impedansi

3.3 Diagram Alir Penelitian

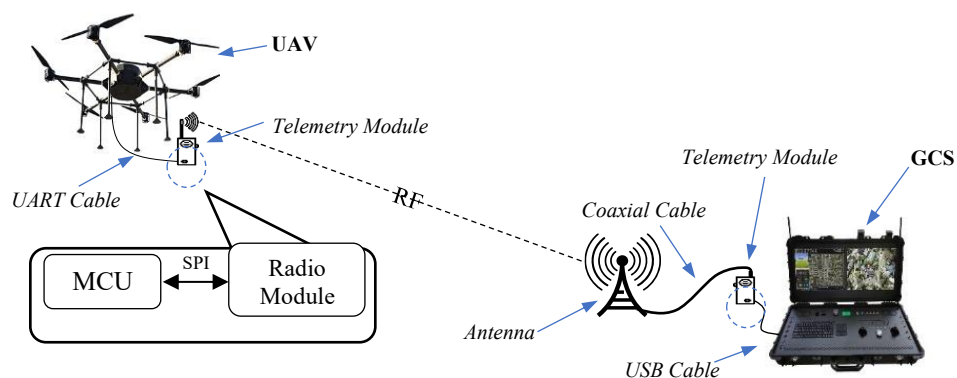


Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

Berdasarkan *flowchart* pada Gambar 3.2, penelitian ini diawali dengan merancang kosep dari sistem yang akan dibuat, setelah IDE dan konsep dari sistem telah di tetapkan langkah berikutnya adalah melakukan studi literatur untuk mencari jurnal, artikel, buku maupun *datasheet* untuk digunakan sebagai acuan dalam penelitian. Setelah mempelajari dari berbagai sumber yang relevan makan akan dilanjutkan dengan pembuatan prototipe dari sistem yang akan dibuat dalam hal ini berupa sebuah modul telemetri.

Setelah prototipe berhasil dibuat maka akan dilakukan pengujian terhadap prototipe tersebut, jika hasil pengujian sesuai dengan yang diharapkan maka akan dilanjutkan ke pengambilan data dan jika hasil pengujian tidak sesuai harapan makan akan dilakukan studi literatur Kembali untuk mencari kesalahan dan memperbaiki prototipe. Setelah prototipe berhasil dan dilakukan pengambilan data selanjutnya melakukan analisa dan juga pembahasan berdasarkan data yang telah di dapat dan proses terakhir adalah penulisan laporan akhir.

3.4 Rancangan Sistem



Gambar 3.3 Alur Komunikasi Sistem Telemetri

Gambar 3.3 menggambarkan sistem komunikasi telemetri yang digunakan untuk menghubungkan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dengan *Ground Control Station* (GCS). Sistem ini terdiri dari dua modul telemetri yang masing-masing mencakup mikrokontroler ESP32 dan modul radio SX1268. Komponen-komponen ini bekerja sama untuk mengirimkan dan menerima data secara nirkabel melalui gelombang radio.

Pada sisi UAV, modul telemetri berfungsi sebagai penghubung antara drone dan sistem komunikasi radio. Mikrokontroler ESP32 menerima data dari UAV melalui koneksi *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART). Setelah data diterima, ESP32 mengirimkannya ke modul radio SX1268 menggunakan antarmuka *Serial Peripheral Interface* (SPI). Modul radio SX1268 kemudian memancarkan data tersebut melalui sinyal *Radio Frequency* (RF) 433 mhz ke arah modul telemetri yang ada pada *Ground Station Control* (GCS).

Pada sisi GCS, modul telemetri bertugas menerima data yang dikirimkan dari UAV. Modul radio SX1268 menerima sinyal radio dari UAV, lalu mentransfer data tersebut ke ESP32 melalui koneksi SPI. Selanjutnya, ESP32 meneruskan data ke GCS menggunakan koneksi *Universal Serial Bus* (USB) atau Wi-Fi, tergantung pada konfigurasi perangkat. Data yang diterima GCS kemudian diproses untuk menampilkan informasi penting terkait UAV, seperti lokasi, status penerbangan, atau parameter lainnya, serta memungkinkan operator untuk mengendalikan UAV.

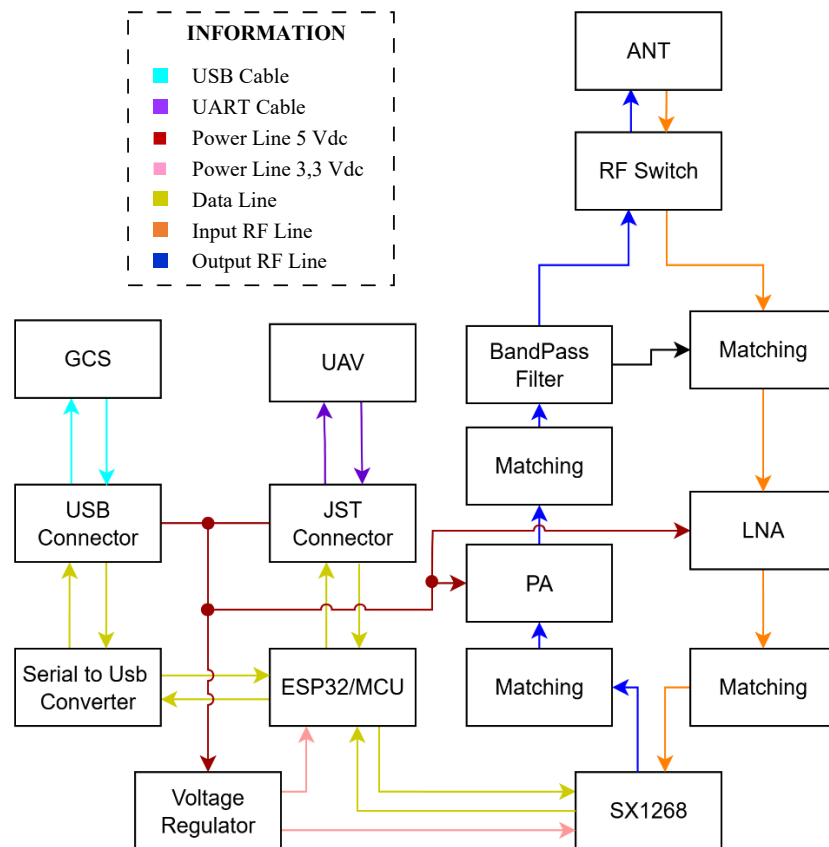
Mission Planner, perangkat lunak yang digunakan pada GCS, memainkan peran penting dalam pengoperasian sistem ini. Dengan *Mission Planner*, operator dapat merencanakan misi UAV, memantau data penerbangan secara *real-time*, dan memberikan perintah kendali kepada UAV. Perangkat lunak ini memanfaatkan data yang diterima dari sistem telemetri untuk memvisualisasikan posisi UAV pada peta, menampilkan status sensor, dan mengirimkan perintah navigasi atau perubahan misi jika diperlukan. Selain itu, *Mission Planner* mendukung fitur-fitur seperti *logging* data penerbangan dan analisis pasca-penerbangan untuk memastikan efisiensi dan keselamatan operasional UAV.

Periode pengiriman data dari drone ke ground menentukan seberapa sering drone mengirimkan data dalam waktu tertentu, biasanya data tersebut berisi posisi GPS, ketinggian, status drone dan mode penerbangan termasuk juga data sensor penerbangan seperti *gyro sensor*, *air speed sensor*, dan *battery sensor*. Interval telemeti (*sensing rate*) tersebut perlu diperhatikan agar bandwidth LoRa tidak terbebani dan memastikan data diterima dengan resolusi yang cukup untuk dianalisis. Interval 1 Hz (1 kali per detik) lebih stabil untuk LoRa karena

bandwithnya rendah dan risiko packet loss lebih rendah tetapi resolusi datanya lebih kasar, sedangkan interval 2 Hz (2 kali per detik) membutuhkan bandwith yang lebih besar dan resolusi lebih tinggi sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan pembaruan cepat.

Sistem ini dirancang dengan harapan untuk memberikan komunikasi yang stabil dan handal, dengan modul Radio SX1268 433mHz yang mampu menyediakan koneksi jarak jauh, sementara antarmuka USB atau WiFi memberikan fleksibilitas dalam integrasi dengan perangkat di GCS. Penggunaan ESP32 sebagai pengendali utama memastikan pengelolaan data yang efisien di kedua sisi sistem.

3.5 Rancangan Desain PCB



Gambar 3.4 Diagram Blok *Hardware Telemetry*

Gambar 3.4 menjelaskan mengenai alur hardware yang digunakan pada sistem telemetry ini dimana selain *Ground Control Station* (GCS) dan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) terdapat dua komponen utama di dalam PCB yaitu SX1268 sebagai chip pembangkit sinyal radio dan juga ESP32 sebagai mikrokontroler yang mengendalikan keseluruhan sistem. Pada diagram blok diatas setiap jalur memiliki warna yang berbeda-beda mewakili fungsi dari setiap jalurnya dimana untuk warna biru muda merupakan jalur USB dari telemetry dengan GCS pada sisi *ground*; warna ungu mewakili jalur komunikasi UART dengan kabel untuk menghubungkan telemetry dengan UAV pada sisi *air*; warna merah mewakili jalur daya dengan tegangan 5 vdc; warna merah muda mewakili jalur daya dengan 3,3 vdc; warna kuning mewakili jalur data di dalam PCB; warna biru tua mewakili jalur *output* sinyal radio menuju antenna; dan warna oranye mewakili jalur *input* sinyal radio dari antenna.

Pada *Printed Circuit Board* (PCB) pada *telemetry* ini terdiri dari 2 modul yaitu modul *Microcontroller Unit* (MCU) dan juga modul *Radio Frequency* (RF). MCU berguna sebagai *controller* dari *telemetry* yang mengatur komunikasi *telemetry* secara keseluruhan seperti pengiriman, penerimaan, mengatur komunikasi dari modul radio ke *Ground Station Unit* (GCS) atau dari modul radio ke *Flight Controller* (FC) pada *drone*. Sedangkan modul Radio berfungsi sebagai pemancar dan penerima sinyal radio yang berfungsi untuk komunikasi antar modul *telemetry* lainnya.

Dalam merancang PCB dalam penelitian ini menggunakan *software/platform EasyEda*, platform ini dapat diakses dari *website* maupun *software* yang terpasang pada PC/Laptop. Langkah yang dilakukan dalam merancang PCB pertama mencari rangkaian referensi yang pada penelitian ini diambil dari *datasheet* ESP32 *Dev-kit* untuk rangkaian MCU dan dari *datasheet* chip Lora SX1268 untuk modul radio, referensi rangkaian dapat juga menggunakan rangkaian pada penelitian lain. Kemudian langkah kedua dilanjutkan mendesain *schematic* berdasarkan referensi dengan menyesuaikan dengan desain prototipe pcb yang akan dibuat. Sebelum mendesain PCB layout, diharuskan untuk menentukan spesifikasi dari pcb yang akan dibuat, dari mulai jumlah layer atau lapisan pcb, bahan pcb, lebar dan tebal jalur pcb, serta nilai impedansi pcb yang akan di buat.

Adapun spesifikasi pcb pada penelitian ini adalah menggunakan jenis bahan fiber FR-4, bahan ini sejenis bahan fiber yang biasa digunakan dalam pembuatan PCB. *Layer* yang digunakan pada perancangan desain PCB ini menggunakan 4 *layer* (lapisan), 4 *layer* di gunakan untuk memudahkan untuk membuat jalur pcb Dimana jika hanya terdiri dari 1 atau 2 *layer* saja akan cukup sulit terutama pada pcb MCU dikarenakan banyaknya komponen yang digunakan dengan *space* PCB yang cukup terbatas maka digunakanlah 4 *layer* PCB.

Berdasarkan *datasheet* IC SX1268, nilai impedansi yang diperlukan pada jalur transmisi RF sebesar 50 ohm. Untuk membuat jalur transmisi RF memiliki impedansi output sebesar 50 ohm dapat dilakukan dengan kalkulator impedansi atau dapat juga dengan melihat referensi pada *website* yang digunakan untuk mencetak PCB yang pada penelitian ini *website* yang digunakan adalah JLCPCB. Dengan memasukkan impedansi yang diinginkan sebesar 50 ohm, maka rekomendasi lebar jalur transmisi dan ketebalan *stackup* (susunan) layer PCB akan muncul seperti yang terlihat pada gambar 3.4 berikut.

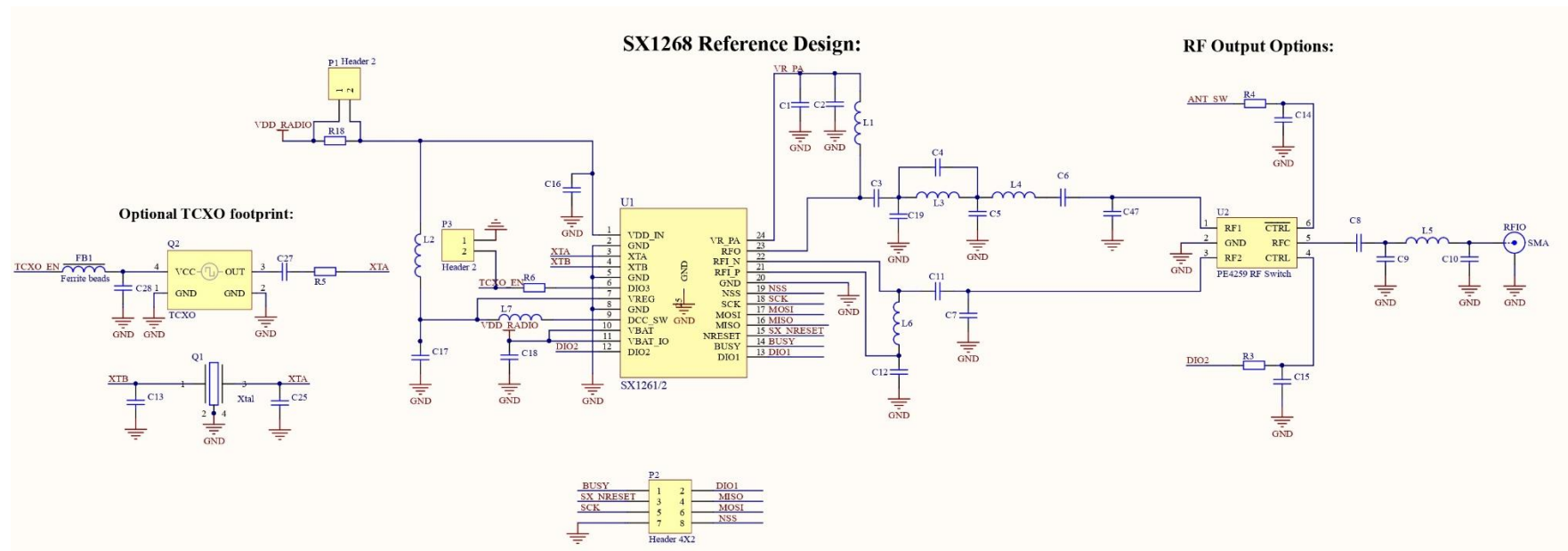
< JLC04161H-3313(Finished thickness1.58mm±10%)		JLC04161H-3313A(Special/Finished thickness1.58mm±10%)		JLC04161H-7628(Standard/Finished thickness1.58mm±10%)>			
Impedance (Ω)	Type	Signal Layer	Top Ref	Bottom Ref	Trace Width	Trace Spacing	Impedance trace to copper
50	Single Ended (Non coplanar)	L1	/	L2	0.3493	/	/
Layer	Material	Thickness (mil)			Thickness (mm)		
L1	Outer Copper Weight1oz	1.38			0.0350		
Prepreg	7628, RC 49%, 8.6 mil	8.28			0.2104		
L2	Inner Copper Weight	0.60			0.0152		
Core	1.1mm HIHOZ with copper	41.93			1.0650		
L3	Inner Copper Weight	0.60			0.0152		
Prepreg	7628, RC 49%, 8.6 mil	8.28			0.2104		
L4	Outer Copper Weight1oz	1.38			0.0350		

Gambar 3.5 *Impedance Calculator* [54].

Pada gambar 3.5 merupakan hasil dari ukuran yang direkomendasikan berdasarkan kalkulator impedansi dengan ukuran impedansi jalur 50 ohm.

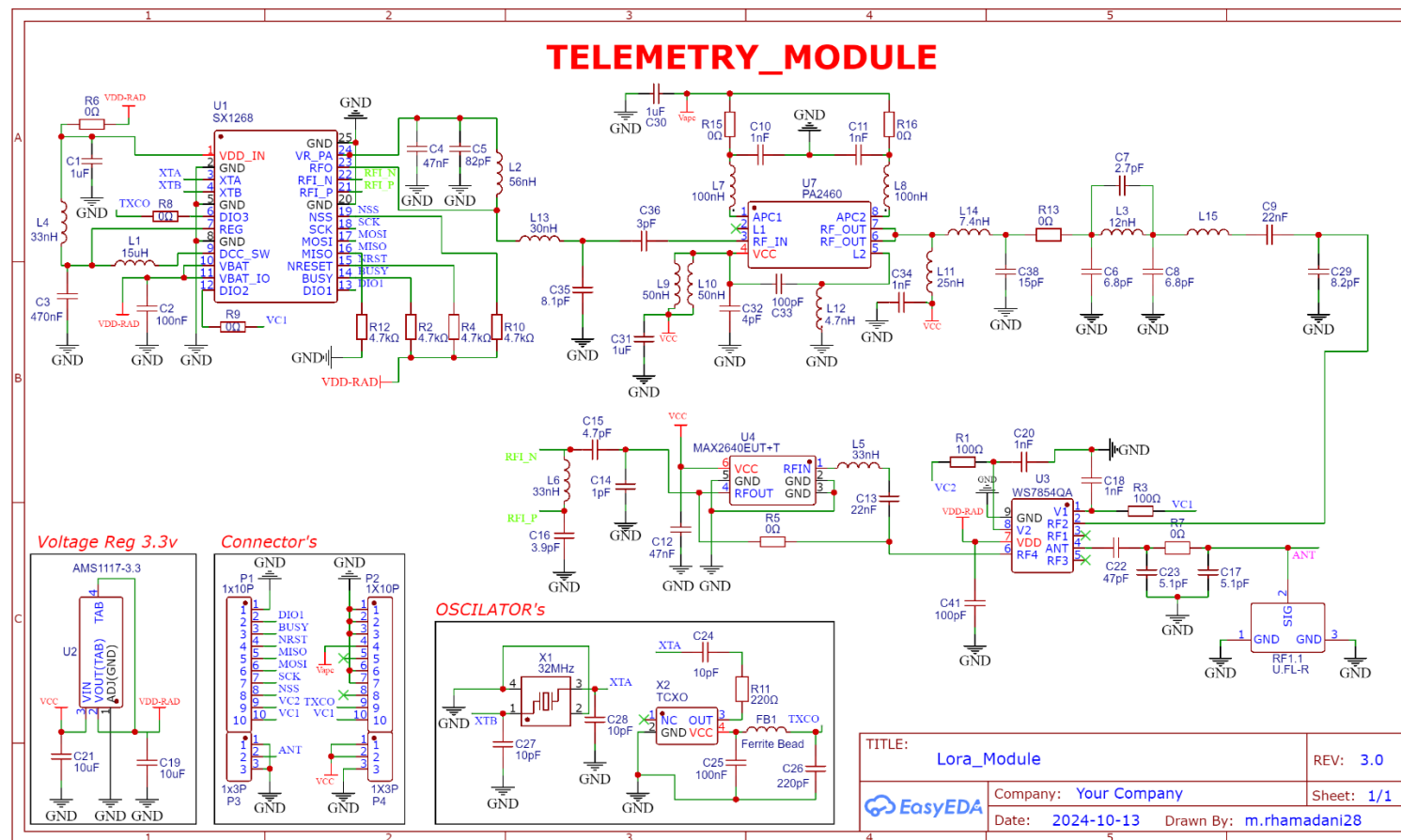
3.5.1 Schematic Modul Radio Frequency (RF) 433 MHz

Rangkaian pada modul *Radio Frequency* (RF) yang digunakan pada penelitian ini menggunakan rangkaian referensi dari *datasheet* chip radio SX1268, rangkaian referensi ini dapat dilihat pada *website semtech.com*, rangkaian referensi modul radio dapat dilihat pada gambar 3.6 dibawah ini.



Gambar 3.6 Referensi skematik SX1268MB1GAS_490MHz [15].

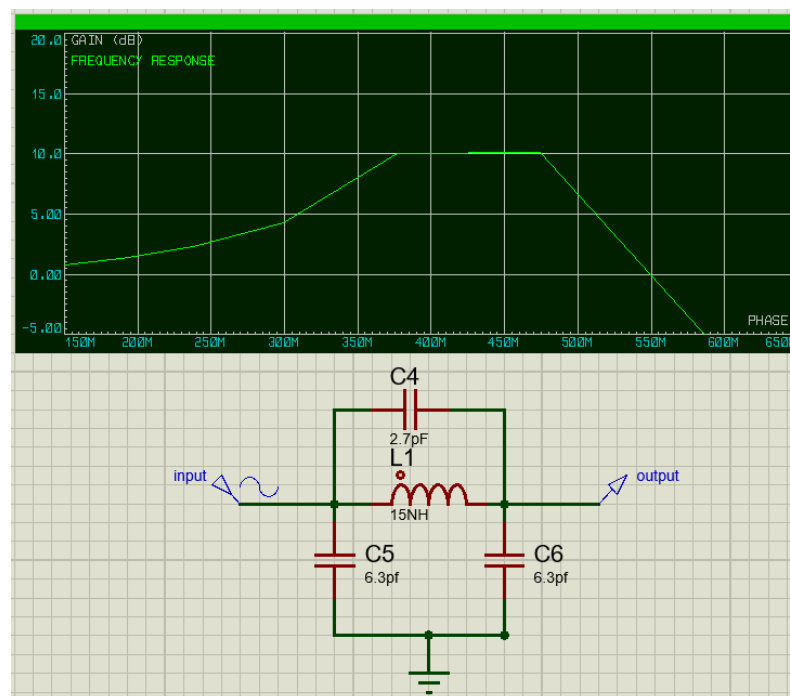
Pada Gambar 3.6, ditampilkan skematik referensi dari datasheet SX1268, yang beroperasi pada frekuensi 490 MHz. Frekuensi kerja modul diatur menggunakan komponen seperti bandpass filter dan matching impedansi. Penyesuaian diperlukan untuk menurunkan frekuensi kerja menjadi 433 MHz, dengan mengganti nilai-nilai komponen pada jalur RF. Adapun *schematic* rangkaian modul radio yang telah dimodifikasi sesuai dengan spesifikasi yang disesuaikan dengan penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Skematik Final Modul Radio 433 MHz

Pada Gambar 3.7 menunjukkan hasil akhir dari desain schematic modul radio 433 MHz. Pada desain ini, semua komponen telah disesuaikan untuk mendukung frekuensi 433 MHz, memastikan jalur transmisi memiliki impedansi 50 ohm untuk meminimalkan kehilangan sinyal. Desain ini juga mencakup pengaturan koneksi antara modul radio dan antenna untuk mengoptimalkan performa transmisi.

Penyesuaian nilai komponen pada *bandpass filter* dilakukan untuk memastikan bahwa sinyal radio dapat melewati frekuensi 433 MHz dengan optimal. Komponen seperti kapasitor dan induktor dipilih dan hasilnya disimulasikan menggunakan *software Proteus*. Simulasi ini membantu memvalidasi performa desain sebelum implementasi pada PCB. Dengan simulasi tersebut, respon frekuensi dapat dianalisis untuk memastikan bandpass filter bekerja sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Hasil grafik dari simulasi *bandpass filter* dapat dilihat pada gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8 Grafik simulasi *Band Pass Filter* dengan *Proteus*.

Pada gambar 3.8 menampilkan grafik dari hasil simulasi rangkaian *Band Pass Filter*, Rangkaian yang dirancang merupakan band-pass filter tipe LC dengan respon Butterworth. Karakteristik Butterworth dipilih karena memiliki sifat

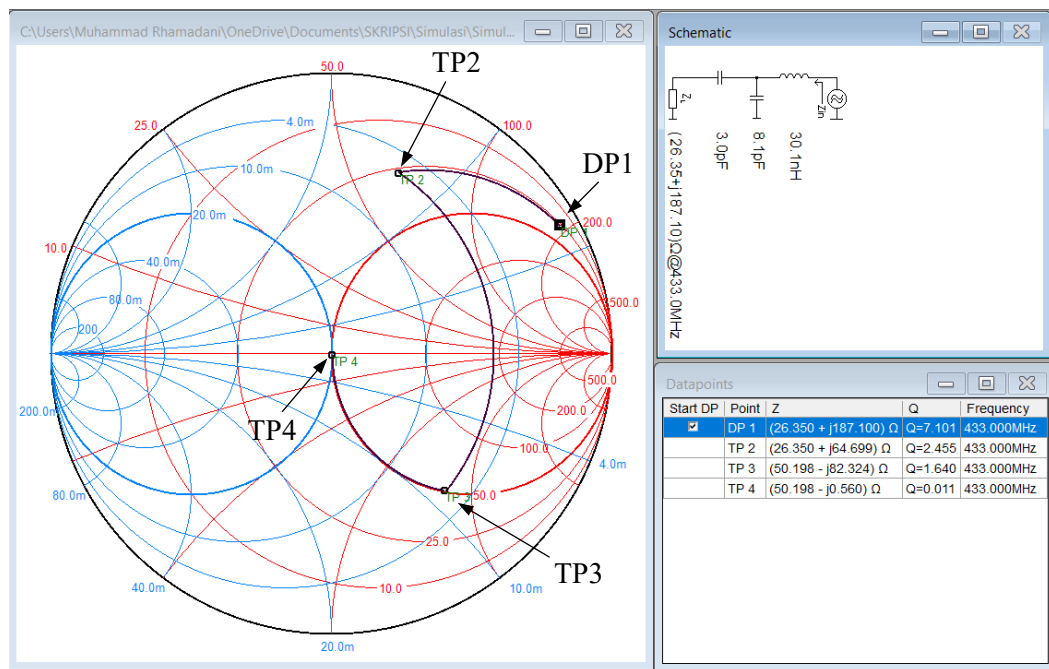
maximally flat pada daerah passband, sehingga tidak menimbulkan ripple pada amplitudo sinyal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa filter menghasilkan gain maksimum sekitar 11 dB, dengan puncak respon yang relatif datar di sekitar frekuensi resonansi.

Frekuensi pusat (center frequency, f_0) dari band pass filter ini diperoleh dari kombinasi induktor $L_1 = 15$ nH serta kapasitor $C_4 = 2,7$ pF, $C_5 = C_6 = 6,3$ pF, termasuk pengaruh kapasitansi parasitik induktor yang dihitung berdasarkan frekuensi resonansi diri (Self-Resonant Frequency, SRF) sekitar 0,8 GHz dengan nilai $C_{L,par} = \frac{1}{(2\pi f_{SRF})^2 L} \approx 2,64$ pF. Dengan memperhitungkan seluruh kapasitansi efektif $C_{eff} = C_4 + \frac{C_5 C_6}{C_5 + C_6} + C_{L,par}$, diperoleh frekuensi resonansi sebesar $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C_{eff}}} \approx 440$ MHz, yang mendekati hasil simulasi sekitar 430 MHz. Frekuensi batas bawah (f_L) dan batas atas (f_H) ditentukan pada titik ketika gain turun 3 dB dari nilai puncak, masing-masing berada pada sekitar 320 MHz dan 460 MHz, sehingga diperoleh bandwidth $BW = f_H - f_L = 140$ MHz. Faktor kualitas dihitung menggunakan $Q = \frac{f_0}{BW}$, menghasilkan nilai $Q \approx 2,8$, yang menunjukkan filter memiliki selektivitas sedang dengan pita lolos (passband) cukup lebar dan stabil pada frekuensi kerja 433 MHz.

Setiap komponen dalam filter memiliki peran spesifik terhadap karakteristik respon. Induktor L_1 berfungsi menentukan posisi frekuensi resonansi; nilai L yang lebih besar akan menurunkan frekuensi pusat. Kapasitor seri C_4 mengontrol lebar passband, sedangkan kapasitor shunt C_5 dan C_6 berfungsi membatasi frekuensi di luar daerah kerja filter. Perubahan nilai kapasitansi akan menggeser frekuensi cutoff serta mempengaruhi nilai Q filter.

Penentuan frekuensi cutoff pada kondisi -3 dB dari gain puncak didasarkan pada definisi standar respon Butterworth, di mana titik -3 dB menunjukkan daya sinyal sudah turun hingga setengah dari nilai maksimum dalam skala logaritmik. Dengan demikian, penggunaan acuan -3 dB memberikan batas yang konsisten dan terukur untuk mendeskripsikan passband filter.

Selain *Band Pass Filter*, rangkain penyesuaian impedansi (*matching impedance*) juga disimulasikan dengan menggunakan simulasi berbasis *Smith Chart* menggunakan *software Smith V4.1*. Simulasi ini bertujuan untuk memastikan rangkain penyesuaian impedansi bekerja sesuai dengan impedansi yang diinginkan. Hasil grafik dari simulasi *Smith Chart* yang dihasilkan pada rangkaian penyesuaian impedansi pada *input dan output* dari komponen *RF Amplifier PA2460* dapat dilihat pada gambar 3.9 dan 3.10 berikut.



Gambar 3.9 Grafik simulasi *matching impedance* pada *input rf amplifier*.

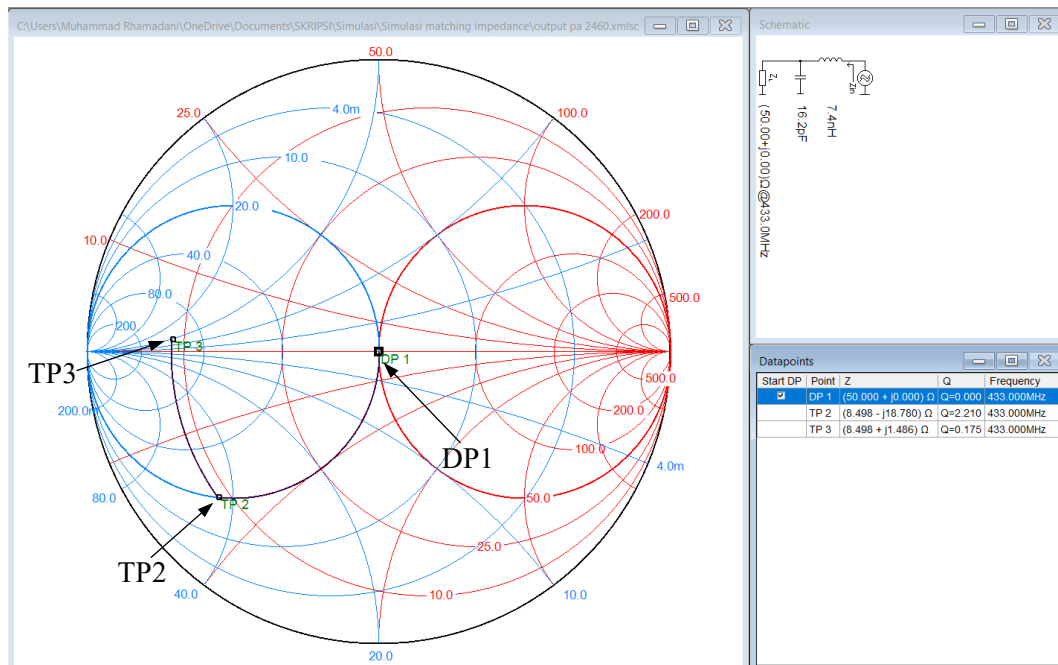
Pada grafik 3.9 menampilkan grafik hasil dari simulasi penyesuaian impedansi pada jalur input *RF Amplifier PA2460*, dapat dilihat pada grafik terdapat garis hitam dengan titik point yang mewakili pengaruh impedansi setiap komponen, point DP1 adalah beban atau impedansi yang ingin disesuaikan. Diketahui impedansi awal yang diperoleh dari hasil pengukuran beban adalah sebesar $26,35 + j187,10 \Omega$. Jika dinormalisasi terhadap impedansi karakteristik sistem sebesar 50Ω , maka nilai impedansi awal tersebut menjadi $z = 0,527 + j3,742$. Nilai ini menunjukkan bahwa beban berada jauh dari titik pusat Smith chart, dengan komponen reaktansi induktif yang dominan sehingga menimbulkan ketidakcocokan (*mismatch*) yang signifikan terhadap sistem transmisi.

Pada tahap pertama proses pencocokan, ditambahkan sebuah kapasitor seri sebesar 3,003 pF. Kapasitor ini memiliki reaktansi sebesar $-122,4 \Omega$ pada frekuensi kerja 433 MHz. Pengaruh penambahan komponen seri adalah mengurangi bagian imajiner dari impedansi tanpa mengubah bagian realnya. Dengan demikian, nilai normalisasi impedansi berubah menjadi $z = 0,527 + j1,294$, yang jika dikembalikan ke bentuk impedansi nyata adalah sebesar $26,35 + j64,70 \Omega$ pada titik TP2. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kapasitor seri berhasil menurunkan dominasi reaktansi induktif pada beban.

Tahap berikutnya adalah penambahan kapasitor shunt sebesar 8,128 pF dengan susceptance sebesar 0,0221 S. Pada domain admitansi, penambahan komponen shunt dilakukan dengan menambahkan susceptance langsung pada nilai admitansi yang telah diperoleh. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai normalisasi impedansi setelah penambahan kapasitor shunt adalah $z = 1,004 - j1,646$, atau setara dengan impedansi nyata sebesar $50,18 - j82,32 \Omega$ pada titik TP3. Kondisi ini memperlihatkan bahwa resistansi beban telah bergeser mendekati nilai karakteristik sistem (50Ω), meskipun masih terdapat reaktansi kapasitif yang cukup besar.

Pada tahap akhir, ditambahkan induktor seri sebesar 30,05 nH yang memiliki reaktansi sebesar $+81,8 \Omega$ pada frekuensi kerja 433 MHz. Karena komponen seri hanya memengaruhi bagian imajiner dari impedansi, nilai normalisasi impedansi berubah dari $z = 1,004 - j1,646$ menjadi $z = 1,004 - j0,011$. Jika dikembalikan ke bentuk impedansi nyata, diperoleh hasil sebesar $50,18 - j0,57 \Omega$ pada titik TP4. Nilai ini sangat dekat dengan impedansi karakteristik sistem, sehingga proses pencocokan dapat dianggap berhasil.

Secara keseluruhan, urutan pencocokan melalui kapasitor seri, kapasitor shunt, dan induktor seri menghasilkan pencapaian kondisi hampir sempurna dengan nilai VSWR sebesar 1,012 dan Return Loss sekitar 4,5 dB. Hal ini menunjukkan bahwa rancangan rangkaian pencocokan yang digunakan efektif dalam meminimalkan pantulan daya dan mengoptimalkan transfer daya dari sumber menuju beban.



Gambar 3.10 Grafik simulasi *matching impedance* pada *output rf amplifier*.

Pada Gambar 3.10 ditampilkan grafik hasil simulasi penyesuaian impedansi pada jalur output RF Amplifier PA2460. Grafik tersebut memperlihatkan lintasan impedansi pada Smith chart, di mana garis hitam dengan titik-titik pengukuran merepresentasikan perubahan impedansi akibat penambahan setiap komponen pencocokan. Titik awal (DP1) merupakan beban atau impedansi yang hendak disesuaikan. Karena analisis dilakukan pada jalur output, maka posisi titik beban dan titik sumber saling dipertukarkan. Dengan demikian, impedansi awal pada sisi port sistem sebesar $50,00 + j0,00 \Omega$, yang jika dinormalisasi terhadap impedansi karakteristik 50Ω menghasilkan $z = 1,000 + j0,000$, ditempatkan sebagai titik DP1. Nilai ini kemudian ditransformasikan untuk menyesuaikan impedansi output PA2460 yang ditargetkan sebesar $8,498 + j1,486 \Omega$. Impedansi target ini ekuivalen dengan $8,45 + j1,55 \Omega$, atau dalam bentuk normalisasi menjadi $z = 0,169 + j0,031$, yang menunjukkan bahwa perangkat memiliki resistansi rendah dengan sedikit komponen reaktansi induktif.

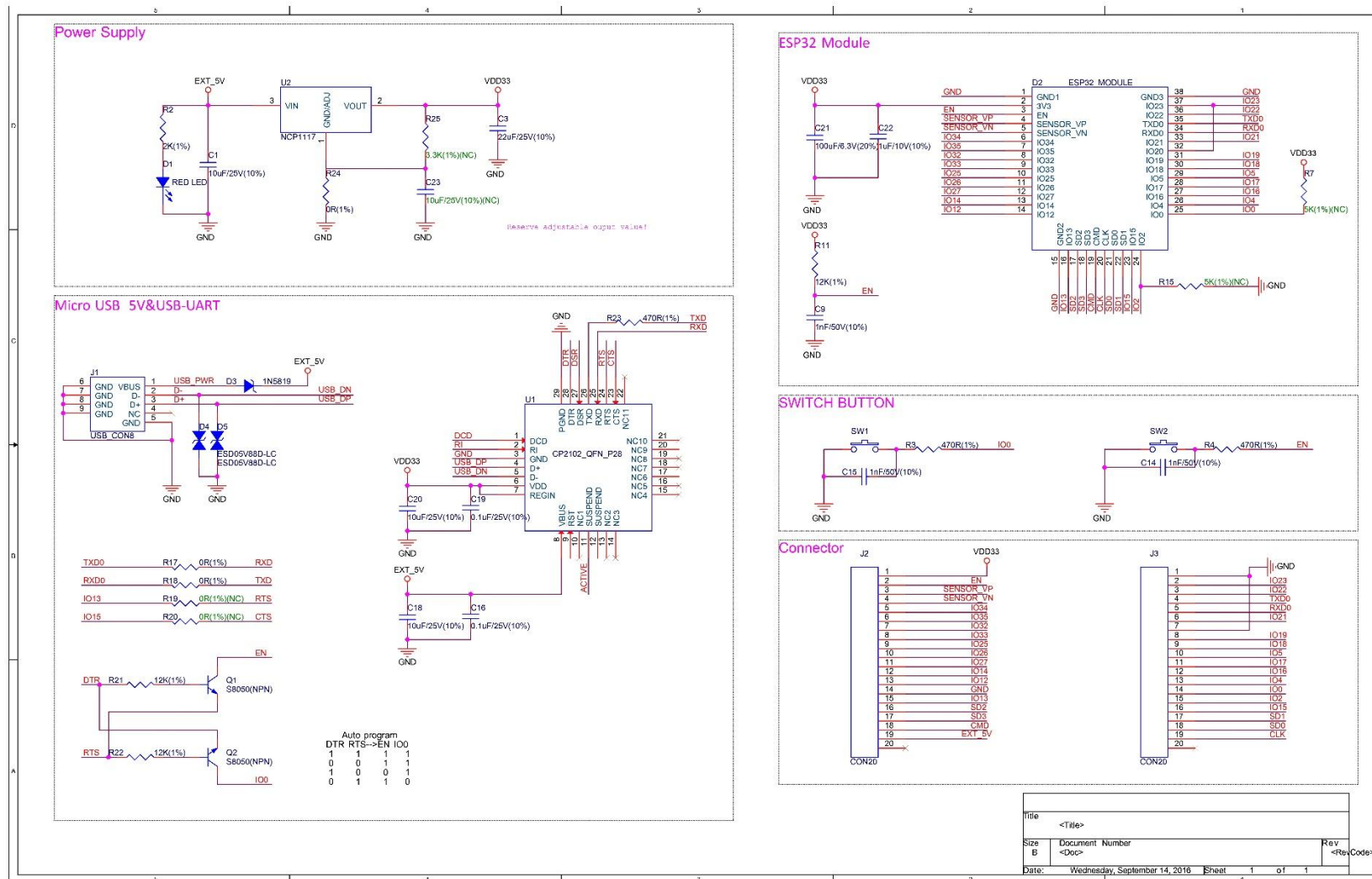
Pada tahap pertama transformasi, ditambahkan sebuah kapasitor shunt sebesar 16,246 pF. Secara teori, penambahan kapasitor shunt dilakukan dalam domain admitansi dengan menambahkan susceptance $B = \omega C$ pada admitansi beban. Hasil transformasi ini menyebabkan perubahan impedansi ternormalisasi dari $z = 0,169$

+ j0,031 menjadi $z = 0,170 - j0,376$. Jika dikembalikan ke bentuk impedansi nyata, nilai ini setara dengan $8,50 - j18,78 \Omega$, yang pada grafik direpresentasikan oleh titik TP2. Kondisi ini menunjukkan bahwa resistansi tetap berada pada orde rendah, namun muncul reaktansi kapasitif yang dominan sebagai akibat dari penambahan kapasitor. Pada titik ini, nilai VSWR relatif tinggi, yaitu sekitar 6,7, dengan Return Loss sekitar 2,6 dB, sehingga masih terjadi pantulan daya yang besar.

Selanjutnya, ditambahkan induktor seri sebesar 7,449 nH dengan reaktansi sebesar $+20,27 \Omega$ pada frekuensi kerja 433 MHz. Komponen induktor seri memengaruhi bagian imajiner dari impedansi secara langsung, sehingga nilai normalisasi bergeser dari $z = 0,170 - j0,376$ menjadi $z = 0,170 + j0,030$. Dalam bentuk impedansi nyata, hasil akhir transformasi ini adalah $8,50 + j1,49 \Omega$, yang ditunjukkan pada titik TP3. Nilai tersebut sangat mendekati impedansi target $8,45 + j1,55 \Omega$, sehingga dapat disimpulkan bahwa jaringan pencocokan telah berhasil mengubah impedansi port sistem 50Ω agar sesuai dengan karakteristik impedansi perangkat PA2460. Pada kondisi akhir ini, nilai VSWR menurun signifikan menjadi sekitar 5,9, dengan Return Loss sekitar 3 dB, yang lebih baik dibandingkan kondisi pada TP2 meskipun masih belum mencapai kesesuaian penuh dengan sistem 50Ω .

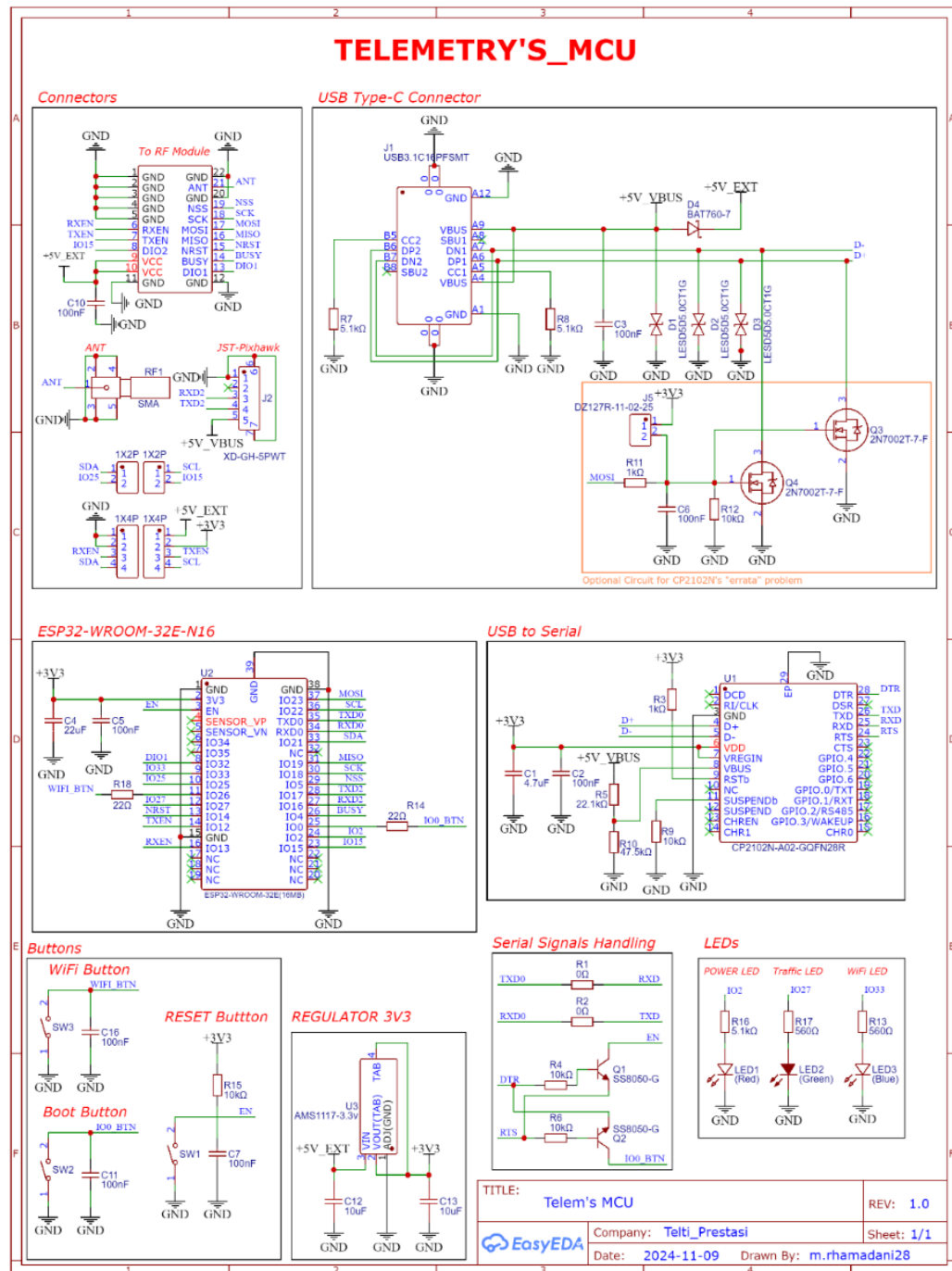
3.5.2 Schematic Modul MCU *Telemetry*

Dalam perancangan Modul MCU (Microcontroller Unit) digunakan rangkaian referensi dari website esp32.com sebagai acuan dasar dalam pembuatan Printed Circuit Board (PCB). Rangkaian ini menjadi pedoman dalam penentuan kebutuhan komponen, mulai dari catu daya, nilai tegangan kerja, hingga konfigurasi pin I/O yang digunakan. Secara garis besar, skematik ini terdiri dari beberapa blok utama, yaitu power supply sebagai penyedia tegangan 3,3 V yang stabil, blok USB–UART untuk komunikasi dan pemrograman, modul inti ESP32 sebagai pusat pengolahan, tombol kendali untuk fungsi reset dan enable, serta konektor I/O untuk integrasi dengan sensor maupun perangkat eksternal. Rangkaian referensi tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Referensi Desain Skematik MCU Telemetry [55].

Pada Gambar 3.11 menunjukkan referensi desain *schematic* dari mikrokontroler ESP32. *Schematic* ini mengatur koneksi UART dan SPI yang akan digunakan untuk menghubungkan modul MCU dengan modul radio serta *Flight Controller* pada UAV. Untuk hasil modifikasi rangkaian MCU yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.12 berikut.



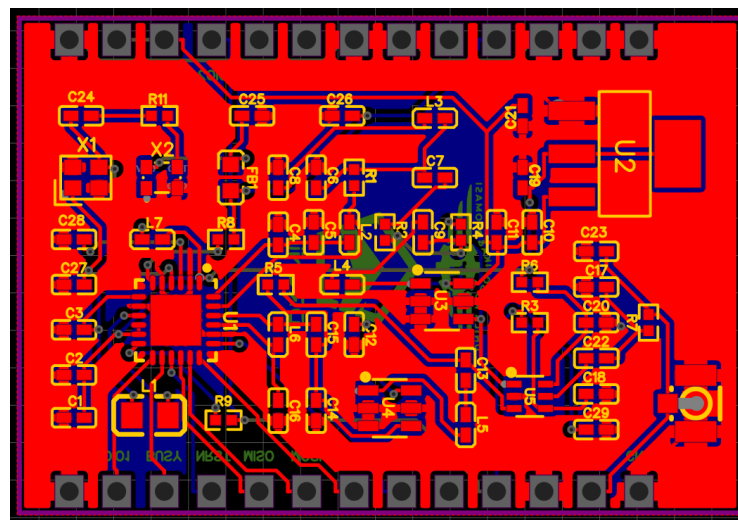
Gambar 3.12 Skematik Final Modul MCU *Telemetry*

Pada Gambar 3.12 ditampilkan hasil akhir desain schematic untuk modul MCU *telemetry*. Desain ini telah disesuaikan dengan kebutuhan penelitian, mencakup konektor untuk komunikasi serial, konfigurasi pin *General Purpose Input/Output* (GPIO), dan komponen pendukung seperti kapasitor dan resistor. Skematik ini dirancang agar fleksibel untuk integrasi ke dalam *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

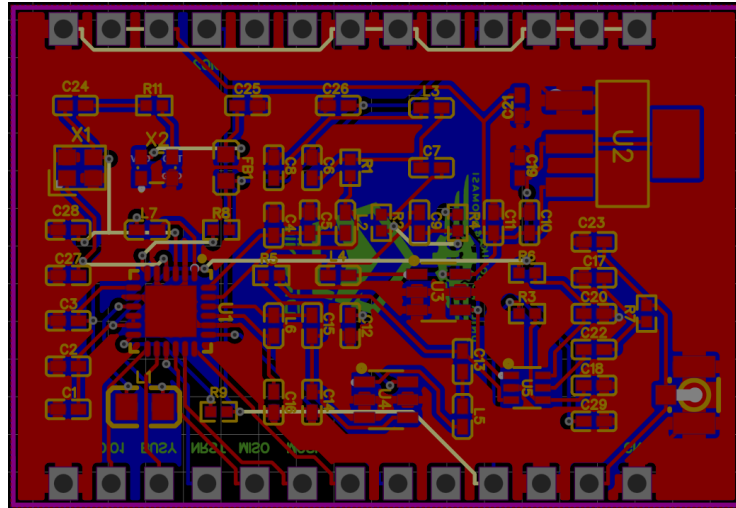
3.5.3 Desain PCB Modul Radio 433 MHz

Desain *Printed Circuit Board* (PCB) untuk modul *Radio Frequency* (RF) 433 MHz dirancang untuk mendukung komunikasi data jarak jauh menggunakan teknologi LoRa. Modul ini bertugas sebagai pemancar dan penerima sinyal radio pada frekuensi kerja 433 MHz. PCB ini menggunakan bahan fiber FR-4 dan teknologi multilayer, yang memastikan pengurangan interferensi, stabilitas sinyal, dan efisiensi distribusi daya. Jalur transmisi RF dirancang dengan impedansi sebesar 50 ohm, sesuai dengan kebutuhan untuk menjaga kualitas sinyal selama transmisi. Desain layout ini dioptimalkan untuk meminimalkan noise dan interferensi antar jalur. Proses desain dimulai dengan pembuatan schematic, diikuti oleh pembuatan layout PCB menggunakan *software EasyEDA*.

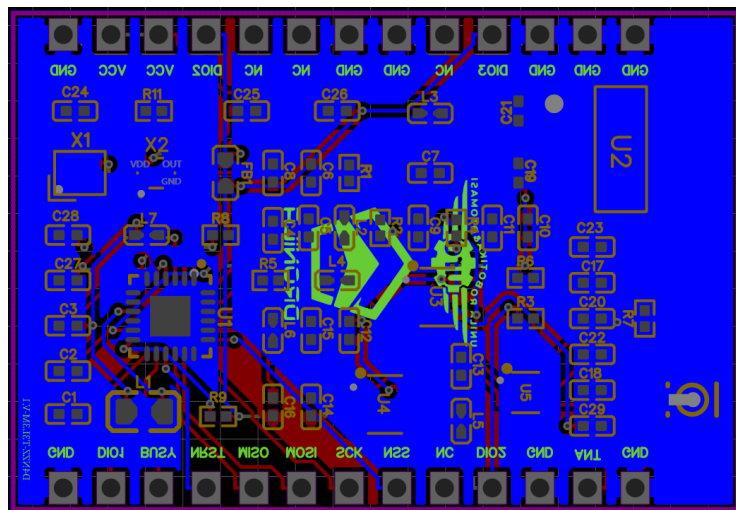
Gambar 3.13.a hingga Gambar 3.13.c berikut menunjukkan hasil desain PCB modul radio, termasuk tampilan layout pada layer-1 sampai layer-4 namun untuk layer-3 tidak ditampilkan karena tidak digunakan pada desain PCB modul radio kali ini.



Gambar 3.13.a Desain PCB Modul Radio 433 MHz Layer 1

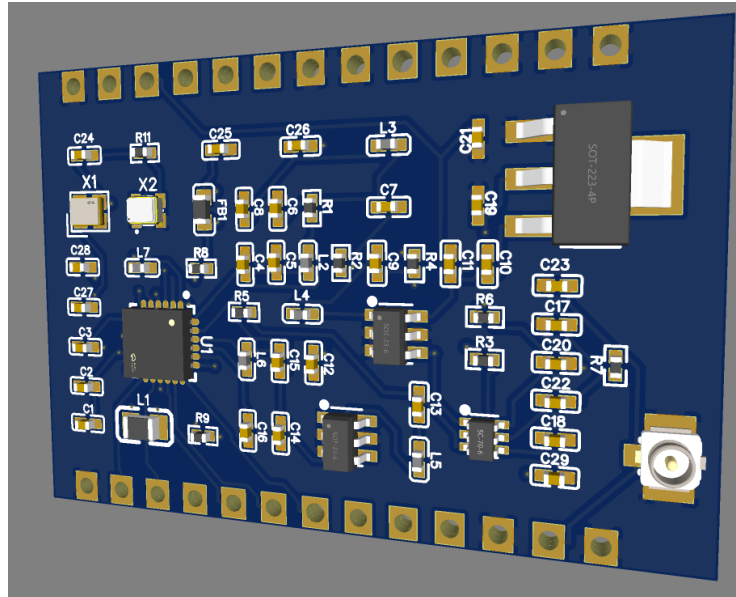


Gambar 3.13.b Desain PCB Modul Radio 433 MHz *Layer 2*



Gambar 3.13.c Desain PCB Modul Radio 433 MHz *Layer 4*

Gambar 3.13.a menampilkan layer pertama atau paling atas dari PCB modul radio ini, pada *layer* pertama ini semua komponen dari modul radio di tempatkan seperti IC SX1268, *Band Pass Filter*, *crystal oscillator*, *Amplifier*. Gambar 3.13.b menampilkan *layer* kedua, gambar 3.13.c menampilkan *layer* keempat. *Layer* ketiga tidak ditampilkan dikarenakan tidak digunakan pada PCB modul radio ini. Komponen-komponen yang terpasang pada *layer* pertama dapat dilihat pada gambar 3.14 berikut.



Gambar 3.14 Tampak 3D PCB Modul Radio 433 MHz

Gambar 3.14 visualisasi 3 dimensi yang menggambarkan bagaimana jalur sinyal, *ground plane*, dan komponen ditempatkan untuk memastikan kinerja radio yang optimal. Gambar diatas merepresentasikan perkiraan bagaimana pcb setelah semua komponen-komponen diimplemetasikan ke PCB nantinya.

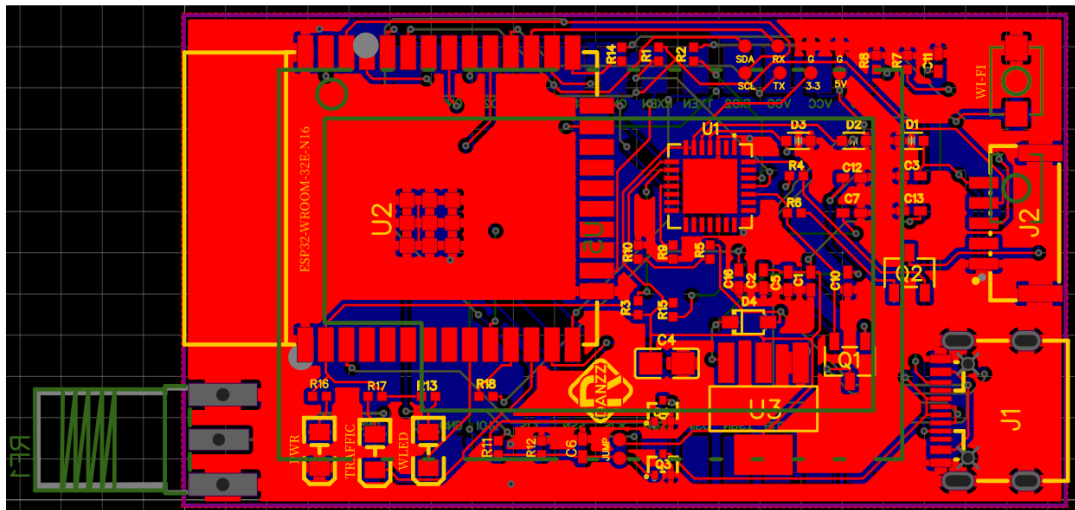
3.5.4 Desain PCB Modul MCU *Telemetry*

Desain PCB untuk modul MCU *telemetry* dirancang untuk mengelola komunikasi antara *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan *Ground Control Station* (GCS). Modul ini bertanggung jawab untuk memproses data yang diterima dari modul radio, serta memastikan pengiriman dan penerimaan data dapat dilakukan secara real-time dan handal.

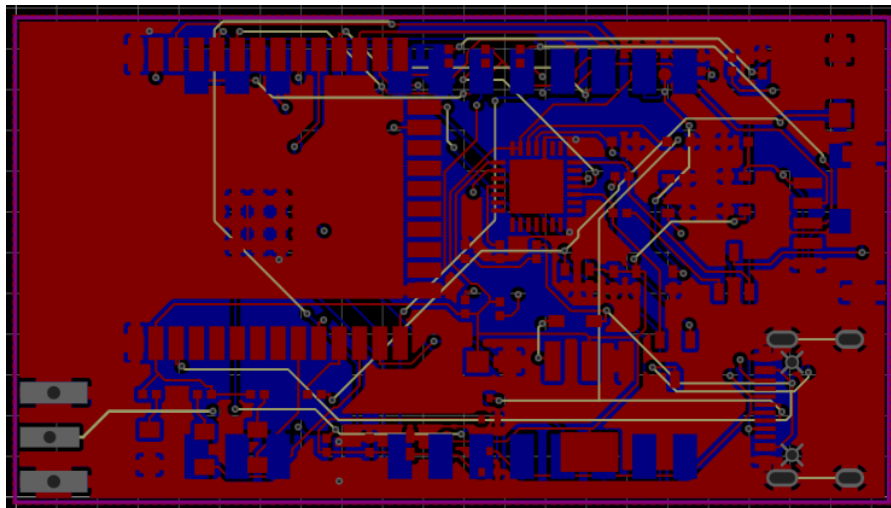
PCB ini menggunakan bahan fiber FR-4 dengan teknologi *multilayer*, yang memungkinkan tata letak komponen yang efisien serta memastikan stabilitas komunikasi. Tata letak dirancang dengan mempertimbangkan posisi jalur komunikasi digital seperti UART dan SPI, serta penempatan konektor untuk memudahkan integrasi dengan sistem UAV.

Desain PCB modul MCU ini mencakup optimasi *routing* untuk meminimalkan interferensi dan memastikan keandalan sistem. Setelah *schematic* selesai, dilakukan simulasi dan validasi desain untuk memastikan semua jalur bekerja sesuai kebutuhan sistem UAV.

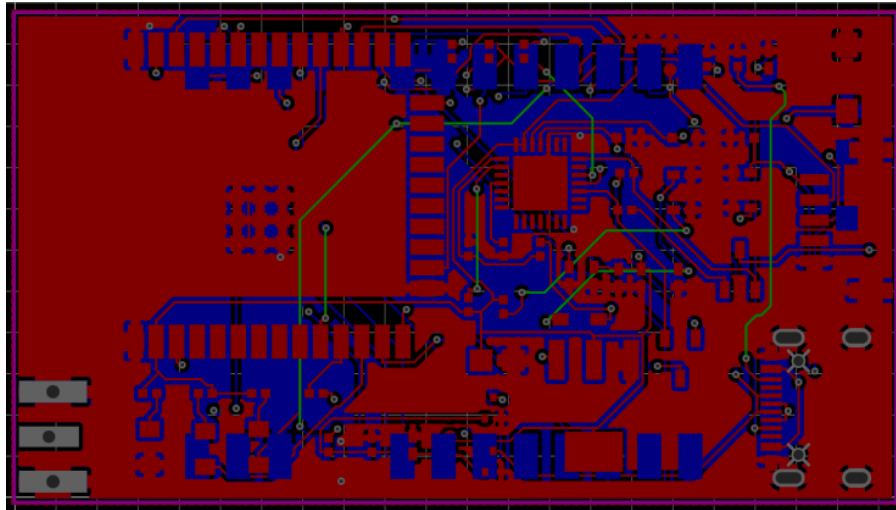
Gambar 3.15.a hingga Gambar 3.15.d berikut menunjukkan hasil desain PCB modul MCU *telemetry*, *layout* pada setiap *layer* mulai dari *layer*-1 hingga *layer*-4.



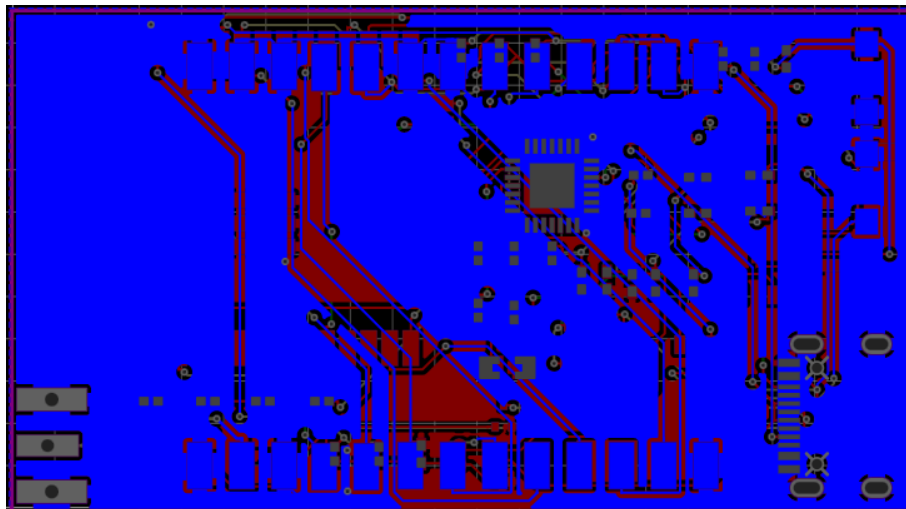
Gambar 3.15.a Desain PCB Modul MCU *Telemetry Layer 1*



Gambar 3.15.b Desain PCB Modul MCU *Telemetry Layer 2*

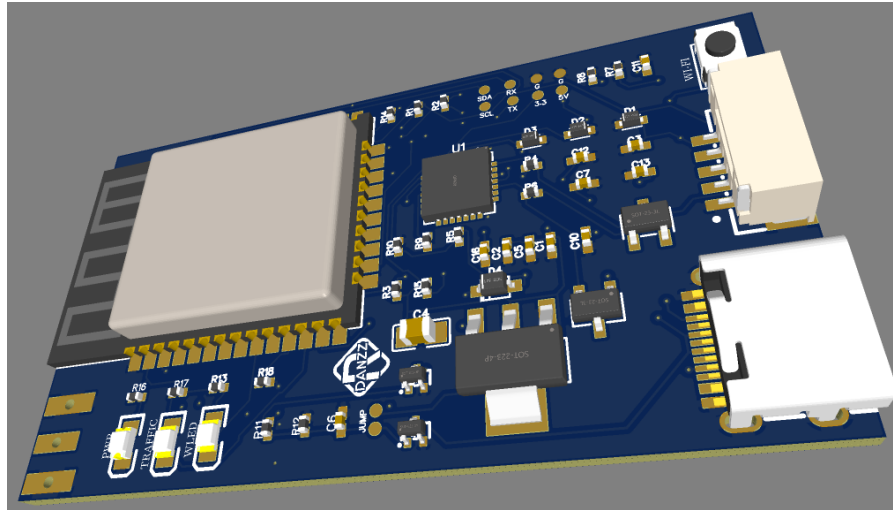


Gambar 3.15.c Desain PCB Modul MCU *Telemetry Layer 3*



Gambar 3.15.d Desain PCB Modul MCU *Telemetry Layer 4*

Gambar 3.15.a menampilkan *layer* pertama pada pcb modul *Microcontroller Unit* (MCU), *layer* pertama merupakan letak dari sebagian besar komponen pada modul MCU ini. Gambar 3.15.b menampilkan *layer* kedua dan *layer* 3.15.c menampilkan *layer* ketiga. Pada *layer* kedua dan *layer* ketiga hanya terdiri dari jalur data saja, tidak terdapat komponen pada *layer* ini. Gambar 3.15.d menampilkan *layer* terakhir atau *layer* keempat dimana letak PCB modul radio nantinya akan melekat pada PCB MCU ini. Tata letak dari PCB MCU dapat dilihat pada gambar 3.16 berikut.



Gambar 3.16 Tampak 3D PCB Modul MCU *Telemetry*

Gambar 3.16 menampilkan visualisasi 3d dari modul MCU setelah komponen-komponen dipasangkan pada PCB. Pada gambar terlihat komponen seperti konektor *type c*, konektor *jst*, *led*, *push button*, regulator, transistor, ic *converter* USB to UART, diode, resistor, kapasitor, dan juga *esp32 wroom*.

3.6 Implentasi Komponen Pada PCB`

Implementasi komponen pada PCB dilakukan dengan alat *Hot plate soldering* dan juga solder biasa. Proses penyolderan diawali dengan mengaplikasikan *solder paste* atau disebut juga timah pasta pada pad di PCB dilanjutkan dengan menempatkan komponen-komponen pada tempatnya, kemudian dipanaskan dengan *hot plate soldering* dan diakhiri dengan analisa *quality control* untuk memastikan komponen tersolder dengan baik pada pcb.



Gambar 3.17 Timah Pasta

Berdasarkan spesifikasinya, timah pasta tersebut dapat meleleh dan matang sempurna ketika dipanaskan pada suhu 220° C. Untuk mengaplikasikan timah

pasta ini agar lebih cepat, rapih dan merata sebaiknya menggunakan cetakan/*stencil*. Cetakan dapat diperoleh ketika mencetak PCB jika jasa percetakannya menyediakannya.



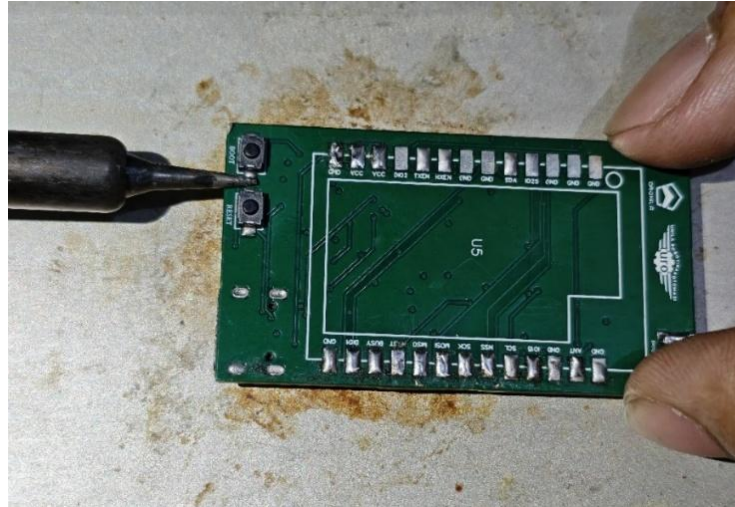
Gambar 3.18 Proses aplikasi timah pasta dengan *stencil*

Setelah itu, komponen SMD ditempatkan di atas *solder paste* sesuai posisi yang ditentukan oleh desain PCB. PCB kemudian diletakkan di atas *hot plate* yang telah dipanaskan hingga suhu yang sesuai dengan profil *reflow soldering solder paste*. Panas dari *hot plate* akan melelehkan *solder paste*, mengikat komponen SMD dengan PCB. Setelah selesai, PCB diangkat dan didinginkan sebelum diperiksa hasil penyolderannya. Namun, metode ini tidak dapat digunakan untuk komponen yang berada pada lapisan/*layer* bawah pada pcb *double layer*, 3 layer, atau 4 layer, sehingga untuk komponen yang berada dibawah perlu disolder secara manual dengan menggunakan *contact solder*.

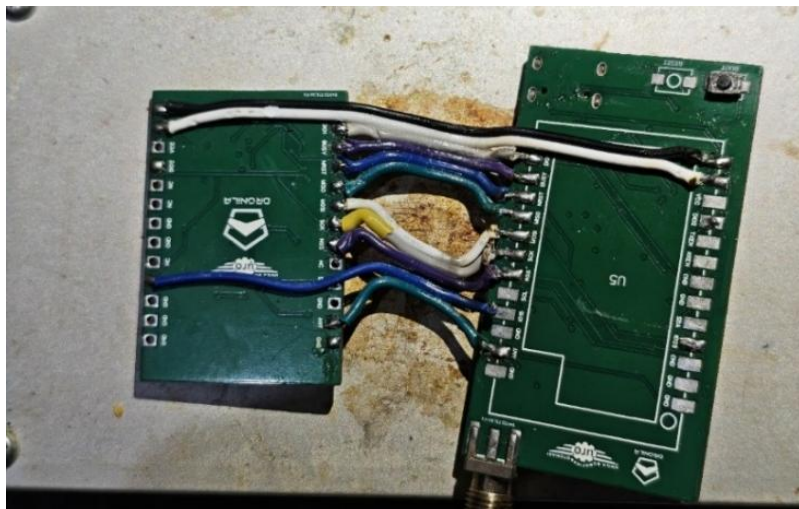


Gambar 3.19 Proses pemanasan dengan *Hot Plate Soldering*.

Untuk pemasangan komponen-komponen pada lapisan bawah seperti push button boot, push button reset dan PCB modul Radio digunakan metode penyolderan manual dengan *contact solder*.

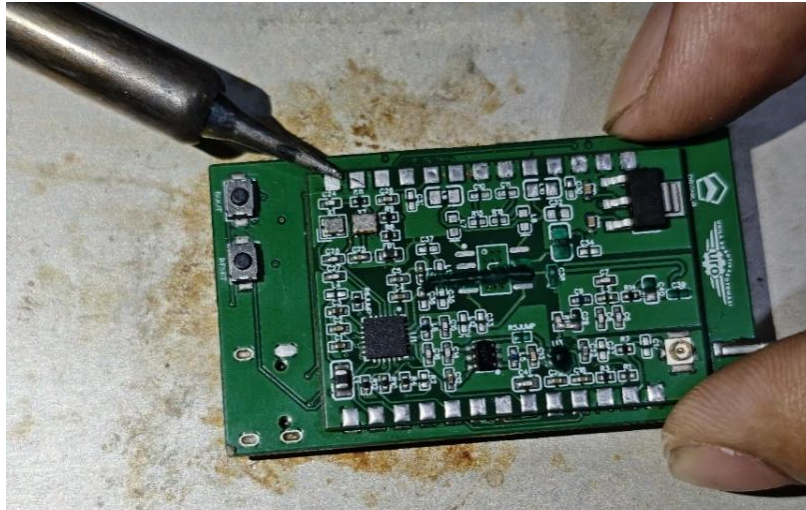


Gambar 3.20 Proses solder *Push Button* secara manual

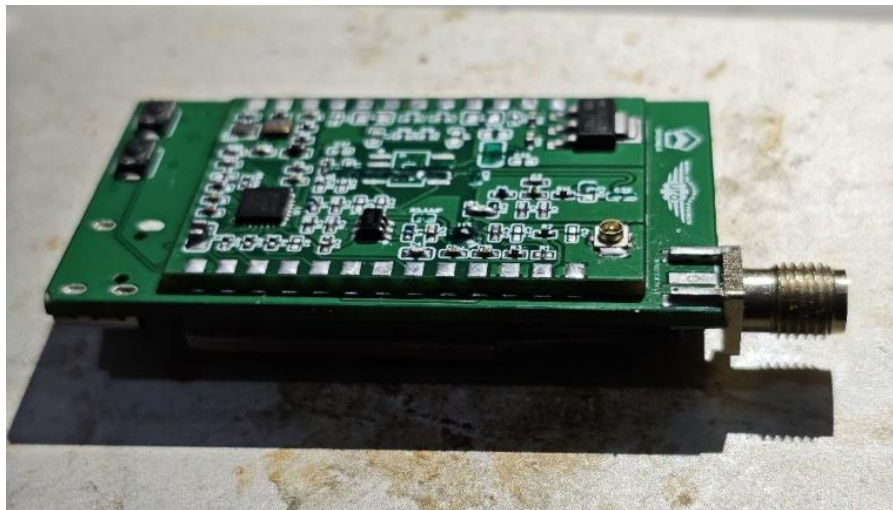


Gambar 3.21 Telemetry yang sudah dihubungkan dengan kabel

Pada penyambungan PCB modul radio dan PCB MCU, modul radio dihubungkan dengan menggunakan kabel jumper terlebih dahulu ke modul MCU untuk dilakukan beberapa pengujian prototipe terlebih dahulu baru kemudian akan disolder secara permanen setelah lolos dari beberapa pengujian prototipe selanjutnya PCB akan di satukan dengan meggunakan *solder contact* yang dapat dilihat pada gambar 3.21.



Gambar 3.22 Proses penyatuan modul MCU dengan modul radio

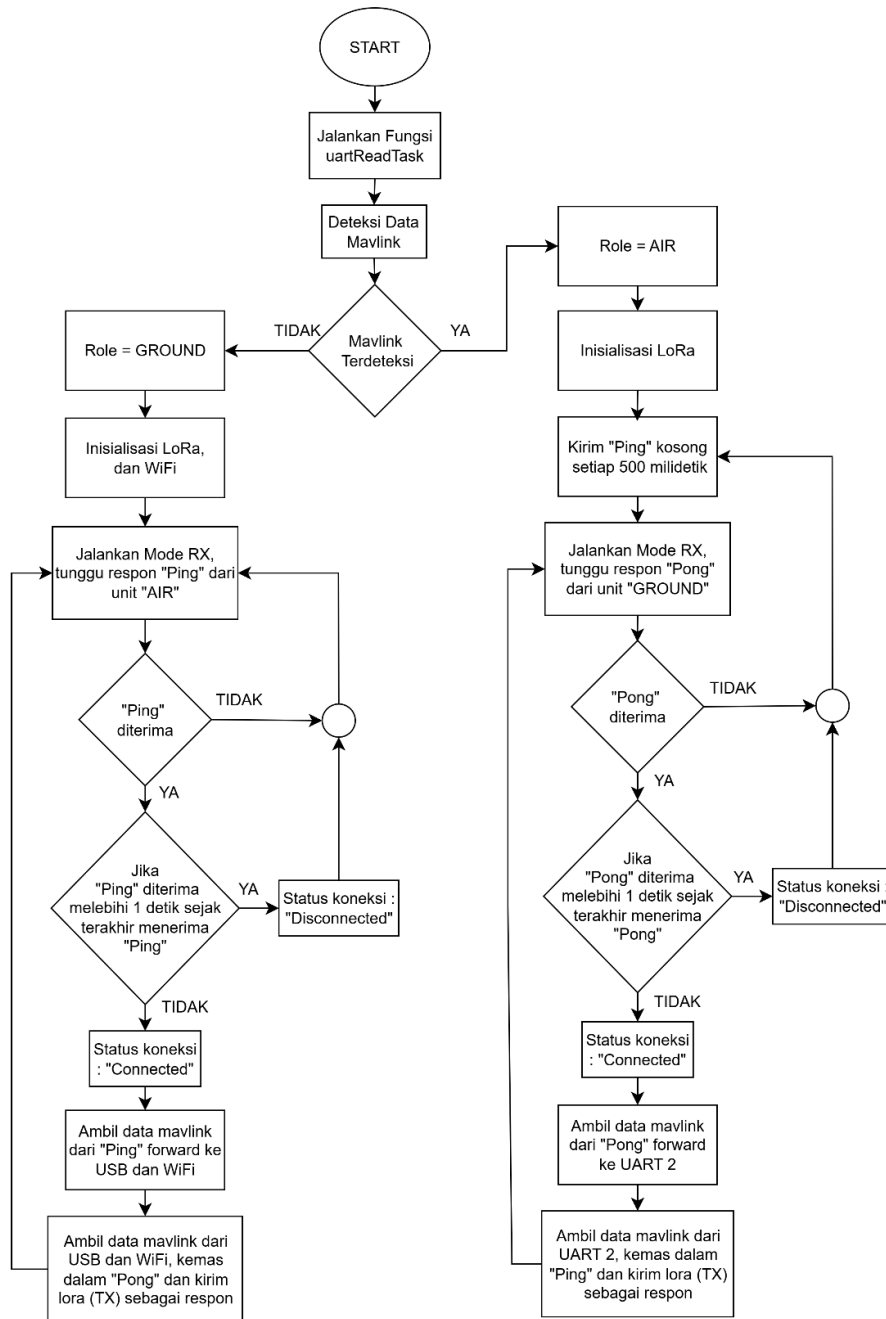


Gambar 3.23 Unit telemetri 433 MHz setelah di satukan

Gambar 3.23 merupakan unit radio telemetri yang sudah di lakukan uji fungsionalitas dan kemudiann disatukan antara kedua modul. Modul radio ditempelkan di bagian belakang modul MCU (*Microcontroller Unit*) tepatnya di *layer* ke-4 dari modul MCU. Setelah disatukan maka unit radio telemetri akan tampak seperti pada gambar 2.23 di atas, unit dibuat dalam

3.7 Pemrograman

Pemrograman dilakukan dengan menggunakan *platform* Arduino IDE dengan menggunakan bahasa pemrograman C++. Diagram alir atau flowchart dari program yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.24.



Gambar 3.24 Diagram Alir Program Telemetry

Berdasarkan gambar 3.23, program dimulai dengan membaca data Mavlink pada jalur UART 2, jika sistem mendeteksi data Mavlink maka peran “*Air*” akan dipilih dan jika tidak mendeteksi maka peran “*Ground*” yang akan dipilih. Fungsi ini memungkinkan program dapat digunakan pada sisi *Ground Control Station* (GCS) dan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) tanpa perlu mengubah program karena sistem akan mengenali peran secara otomatis (*hybrid*).

Jika peran perangkat dikonfigurasi sebagai *AIR*, maka sistem akan menginisialisasi LoRa dan setelah inisialisasi berhasil kemudian sistem akan mengirimkan "Ping" kosong setiap 500 milidetik. Setelah mengirim, perangkat beralih ke mode terima untuk menunggu respons "Pong" dari unit *GROUND*. Sistem menghitung berapa lama "Pong" diterima, jika melebihi satu detik sejak “Pong” terakhir diterima, maka koneksi dianggap terputus, dan jika tidak koneksi tetap dianggap terhubung. Kemudian data *MAVLink* dari "Pong" dikirim ke UART 2. Kemudian, data lain dari UART 2 yang akan dikirim ke GCS akan di kemas dalam *payload* dengan *header* "Ping" dan dikirim melalui LoRa sebagai balasan ke *GROUND*.

Jika peran perangkat dikonfigurasi sebagai *GROUND*, maka sistem akan menginisialisasi LoRa dan Wi-Fi, dan setelah inisialisasi berhasil kemudian sistem akan menuju mode terima LoRa (RX) dan menunggu data dengan *header* "Ping" dari unit *AIR*. Sistem akan menghitung berapa lama "Ping" diterima, jika melebihi satu detik sejak “Ping” terakhir diterima, maka koneksi dianggap terputus, dan jika tidak koneksi tetap dianggap terhubung. Kemudian data didalam “Ping” akan diteruskan ke Wi-Fi dan USB dan juga data dari Wi-Fi dan USB yang akan dikirim ke UAV akan dikemas didalam header “Pong” untuk dikirim kembali ke air.

Jika dilihat pada flowchart, sistem tidak memiliki akhir proses (selesai) sehingga sistem akan terus looping/mengulang proses ping-pong. Hal ini bertujuan untuk membentuk komunikasi 2 arah antara UAV dan GCS secara terus menerus selama koneksi terhubung yang memungkinkan kedua sisi dapat saling berkomunikasi.

3.8 Skenario Pengujian

Pengujian dibagi menjadi tiga skenario pengujian berupa pengujian fungsionalitas perangkat, pengujian performa sistem, dan pengujian komunikasi *Mavlink*.

Skenario pertama adalah menguji kemampuan perangkat. Sebelum pengujian yang lebih kompleks dilakukan, pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa setiap komponen dasar sistem mampu berfungsi dengan baik. Pertama, tegangan keluaran regulator 3,3 V pada modul ESP32 dan SX1268 diperiksa dengan multimeter digital. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa tegangan pada keluaran regulator bekerja dalam batas toleransi komponen yang digunakan. Ini memastikan bahwa modul tidak akan mengalami undervoltage atau drop tegangan yang dapat mengganggu kestabilan operasinya dan bahkan dapat juga meruika komponennya. Pengujian kemudian dilakukan dengan menghubungkan modul dengan laptop melalui jalur USB. Pada tahap ini, perangkat lunak Arduino IDE mendeteksi port komunikasi dengan benar dan dilanjutkan dengan *upload* program sederhana berupa kontrol LED indikator. Selanjutnya, pengujian komunikasi antara MCU dengan chip radio SX1268 diuji dengan komunikasi SPI. Untuk pengujian ini, firmware uji khusus digunakan untuk menampilkan status inisialisasi modul SX1268 pada monitor serial. Setelah memverifikasi bahwa perangkat lunak dan perangkat keras terhubung dengan benar, pengujian fungsionalitas dilanjutkan dengan mengukur daya keluaran sinyal menggunakan *specturm analyzer* dengan menggunakan kabel langsung tanpa perantara antena. Pada tahap ini, antena dilepas, dan output RF kemudian dihubungkan langsung ke *specturm analyzer*. Hasil pengukuran mencatat nilai frekuensi carrier dan level daya keluaran dalam satuan dBm. Jika ada anomali, seperti tingkat daya yang rendah, sumber masalah diidentifikasi dengan mengubah konfigurasi jalur penguat daya, juga dikenal sebagai *power amplifier*.

Skenario kedua melibatkan menguji kinerja sistem. Pengujian dilakukan dengan mengirimkan paket data dari sisi TX atau telemetry *air* ke sisi RX yaitu telemetry *ground*. Pada sisi TX diterbangkan pada ketinggian 71 meter dengan menggunakan *drone DJI Phantom 4* dan pada sisi RX berada di ketinggian 12 meter dengan kondisi *line of sight* (LOS) atau tanpa halangan. Data yang digunakan pada pengujian berupa data *dummy* dengan jumlah 20 paket data dengan masing-masing paket berukuran 200 *byte* dengan total data yang dikirim 4000 *byte* data atau 4 kb pada setiap sesi pengujian dengan lama durasi setiap sesi dari mulai persiapan, take off, proses transmit, proses landing adalah 7 menit.

Pengujian dilakukan dari jarak 1 hingga 30 kilometer dengan interval jarak pengujian per 1 kilometer, setiap titik jarak dilakukan 2 sesi pengujian dengan 1 sesi dengan parameter SF=7 dan 1 sesi lainnya dengan parameter SF=8 sehingga durasi pengujian tiap satu titik jarak dengan 2 sesi terbang adalah 14 menit. Parameter yang diuji pada skenario ini adalah RSSI, SNR, persentase paket hilang, dan juga lama pengiriman atau *time on air* (TOA). RSSI dan SNR diperoleh dari *library* code bawaan chip ic sx1268, persentase dihitung dari perbandingan paket yang diterima dengan total paket yang dikirim, dan TOA dihitung berdasarkan rumus *airtime*.

Skenario ketiga yaitu pengujian komunikasi *Mavlink*. Fungsinya adalah untuk memastikan integrasi *end-to-end* antara kontrol pesawat (*Pixhawk*) dan *Ground Control Station* (GCS). Pada skenario ini masih sama seperti skenario sebelumnya, telemetri *Air* diterbangkan dengan drone hanya saja yang membedakannya pada skenario ini telemetri *Air* tidak mengirimkan data dummy namun langsung mengirimkan data *mavlink* dari *flight controller Pixhawk* untuk dikirimkan ke GCS pada telemetri ground dan sebaliknya sehingga pada skenario ini komunikasi yang terjadi adalah komunikasi 2 arah yang artinya GCS tidak hanya mendapat data *mavlink* dari UAV saja namun juga dapat secara aktif mengendalikan drone seperti mengubah mode penerbangan, memberi perintah untuk kembali, dan memberikan misi ke UAV. Untuk parameter yang diperoleh antaralain kecepatan *downlink*, kecepatan *uplink*, paket hilang, total paket ter-download, total paket ter-upload, *link quality*, dan jeda maksimal setiap packet diterima, parameter-parameter tersebut dapat diperoleh dari menu link status pada mission planner. Selain itu juga terdapat data *telemetry-log* yang dapat diakuisisi dari UAV melalui *mission planner* yang berisi seluruh data penerbangan seperti gps, posisi, sensor pada UAV, kualitas RSSI, dan data penerbangan lainnya. Pengujian komunikasi mavlink dilakukan selama 1 sesi terbang DJI Phantom 4 dengan lama sesi terbang, kurang lebih 10 menit 34 detik dengan ketinggian 60 hingga 80 meter dan jarak hingga 200 meter.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Rancangan PCB modul MCU dan modul radio yang dibuat berhasil direalisasikan, modul MCU dapat melakukan upload dan eksekusi program serta menjalankan modul radio dan untuk modul radio berhasil menghasilkan sinyal radio dengan frekuensi 433 MHZ dan menerima sinyal radio 433 MHZ dari modul lain.
2. Frekuensi radio yang dihasilkan oleh modul radio cukup akurat dengan frekuensi 433,028424 MHz dengan pergeseran hanya 0,028424 MHz. Namun dengan daya hanya mencapai $+11,64$ dBm saja dari yang seharusnya $= 33$ dBm.
3. Berdasarkan pengujian performa, walau hanya dengan daya output $= +11,64$ dBm modul telemetri dapat mengirimkan data dengan jarak maksimum 30 km dalam kondisi *Line of Sight* (LOS) dengan RSSI $= -32$ dBm dan SNR $= -10$ dB pada *Spreading Factor* (SF) 7 dan juga RSSI $= -130$ dBm dan SNR $= -9$ dB pada *Spreading Factor* (SF) 8.
4. Parameter *Spreading Factor* (SF) sangat mempengaruhi kualitas sinyal dan juga *Air Time* (lamanya proses pengiriman) semakin besar nilai SF maka kualitas sinyal semakin baik namun secara bersamaan juga meningkatkan secara signifikan nilai *Air Time*.
5. Dalam pengujian komunikasi mavlink menunjukkan bahwa modul telemetri ini dapat digunakan untuk komunikasi dua arah (*duplex*) dengan kecepatan transfer dari UAV ke GCS (*downlink*) $= 900$ Bps sampai dengan 1,12 kbps dan dari GCS ke UAV (*uplink*) $= 25$ Bps hingga 192 Bps.

5.1 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Menggunakan chip amplifier berbasis MOSFET dibanding dengan chip berbasis BJT. Dengan menggunakan chip amplifier berbasis MOSFET lebih menguntungkan pada desain rangkaian yang lebih simpel dan lebih mudah pengaturan penyesuaian impedasinya.
2. Untuk meningkatkan sinkronisasi antara kedua node telemetri, disarankan menambahkan chip RTC pada modul MCU untuk mengurangi terjadinya miss match atau ketidaksinkronan dalam pengiriman antara kedua node perangkat.
3. Untuk meningkatkan kestabilan komunikasi agar tidak mudah terputus meski kualitas sinyal masih cukup baik, disarankan untuk mengembangkan program komunikasi duplex dari metode berbasis ping-pong yang digunakan pada program saat ini dengan metode berbasis (Time Division Multiplexing) TDM yaitu metode yang memanfaatkan slot atau jadwal waktu yang telah ditentukan untuk mengontrol proses RX/TX alih alih menunggu marking Ping/Pong dari node pasangan untuk mentrigger proses TX.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. J. Silalahi, F. T. H. Feryandi, and P. Sidabutar, “Pemanfaatan Teknologi Citra Satelit dan Drone untuk Pengelolaan Pertanahan di Wilayah Perbatasan Indonesia” *J. Pertanah.*, vol. 11, no. 1, Jul. 2021, doi: [10.53686/jp.v11i1.12](https://doi.org/10.53686/jp.v11i1.12)
- [2] R. H. Y. Perdana, M. Junus, and J. A. Prasetyo, “*Vertical take off landing (VTOL) untuk drop kits pada quadcopter*” *Journal of Applied Smart Electrical Network and System (JASENS)*, vol. 1, no. 1, pp. 25–30, 2020, doi: [10.52158/jasens.v1i01.27](https://doi.org/10.52158/jasens.v1i01.27).
- [3] J. Glossner, S. Murphy, and D. Lancu, “*An Overview of the Drone Open-Source Ecosystem*” *Comput. Sci. Cornell Univ.*, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.02260>
- [4] A. Yusri, N. M. Adriansyah, and A. T. Hanuranto, “*Microwave Link License Fee for 5G Backhaul Connectivity (Study Case: Indonesia)*” *Bul. Pos dan Telekomunikasi*, vol. 21, no. 2, pp. 1–17, Dec. 2023, doi: [10.17933/bpostel.v21i2.375](https://doi.org/10.17933/bpostel.v21i2.375)
- [5] Misbahuddin, L. Ahmad, S. I. Akbar, D. F. Budiman, and A. Natsir, “*Compromise of 915 MHz LoRa Transmission Parameters in A Single-hop Uplink*” in 2021 International Conference on Computer System, Information Technology, and Electrical Engineering (COSITE).
- [6] M. A. Hariyadi and J. N. Fadila, “*Evaluation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Control Range System using Lora-Based Communication System using Path Loss*” *Fountain Informatics J*, vol. 7, no. 2, pp. 57–63, Nov. 2022, doi: [10.21111/fij.v7i2.7571](https://doi.org/10.21111/fij.v7i2.7571)
- [7] A. F. Rozie, Nofirman, dan D. N. Adnyana, “*Aplikasi Metode Reverse Engineering dalam Menentukan Parameter Layak Pakai pada High Speed Diesel Tank*” in *Proc. Seminar Nasional Teknologi Industri (SNTI) VIII*, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta, pp. 278–283, 2021.

- [8] J. Simón, J. R. Gómez-Rodríguez, M. Cárdenas-Juárez, V. I. Rodríguez-Abdalá, R. Sandoval-Arechiga, S. Ibarra-Delgado, J. L. Álvarez-Flores, J. Villanueva-Maldonado, dan J. Flores-Troncoso, “*A miniature IoT-based Ground Station at 433 MHz for reception of telemetry packets from LoRa satellites*” DIFU100ci@ Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías, vol. 17, no. 2, pp. 1–6, Aug. 2023.
- [9] M. H. M. Ghazali, K. Teoh, dan W. Rahiman, “*A systematic review of real-time deployments of UAV-based LoRa communication network*” IEEE Access, vol. 9, no. 124817, pp. 124817–124830, Sept. 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3110872](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110872)
- [10] F. Minucci, “*Reliable communication and accurate sensing for UAV traffic management*” disertasi Ph.D., Dept. of Electrical Engineering, KU Leuven, Leuven, Belgium, Juni 2023. [Online]. Available: <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/688795>
- [11] A. Faiz, A. Kusyanti, and R. A. Siregar, “Implementasi Pengamanan Protokol MAVLink menggunakan Algoritma Kriptografi SIMECK” vol. 6, no. 10, pp. 4678–4685, Oct. 2022, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [12] L. H. B. Santos *et al.*, “*Monitoring Industrial Systems Using ESP-NOW Protocol with Mesh and Ad Hoc Network*” in 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), Nov. 2023, pp. 559–566. doi: [10.1109/INDUSCON58041.2023.10374804](https://doi.org/10.1109/INDUSCON58041.2023.10374804)
- [13] Y. Jiang *et al.*, “*Bandpass Filter With Ultra-Wide Upper Stopband on GaAs IPD Technology*” IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs, vol. 69, no. 2, pp. 389–393, Feb. 2022, doi: [10.1109/TCSII.2021.3096936](https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3096936)
- [14] B. Li, L. Xiong, Z. Jin, J. Wang, and H. Tian, “*A Method of Connecting Traditional Energy-Consuming Equipment to the Internet of Things*” J. Phys. Conf. Ser., vol. 2365, no. 1, p. 012040, Nov. 2022, doi: [10.1088/1742-6596/2365/1/012040](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2365/1/012040)

- [15] Semtech Corporation, “SX1268 LoRa® Transceiver Data Sheet” DS.SX1268.W.APP, Rev. 1.2, Des. 2024. Semtech Corporation: Camarillo, CA, USA. [Online]. Available: <https://www.semtech.com>
- [16] Espressif Systems, “ESP32-WROOM-32E & ESP32-WROOM-32UE Datasheet” Version 1.9, Desember 2023. Espressif Systems: Shanghai, China. [Online]. Available: https://espressif.com/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf
- [17] W. He, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, “An Internet of Things—Supervisory Control and Data Acquisition (IoT-SCADA) Architecture for Photovoltaic System Monitoring, Control, and Inspection in Real Time” *Electron.*, vol. 14, no. 1, 2025, doi: [10.3390/electronics14010042](https://doi.org/10.3390/electronics14010042)
- [18] A. B. S. Umbu, “Desain *band pass filter* dengan frekuensi *cut-off* 1 kHz dan 100 kHz untuk sistem *electrical impedance tomography* (EIT)” *ORBITA: Jurnal Hasil Kajian, Inovasi, dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, vol. 9, no. 1, pp. 58–63, Mei 2023.
- [19] A. R. Carr, Y. H. Patel, C. R. Neff, S. Charkhabi, N. E. Kallmyer, H. F. Angus, and N. F. Reuel, “Sweat monitoring beneath garments using passive, wireless resonant sensors interfaced with laser-ablated microfluidics” *NPJ Digital Medicine*, vol. 3, no. 62, pp. 1–9, May 2020, doi: [10.1038/s41746-020-0270-2](https://doi.org/10.1038/s41746-020-0270-2)
- [20] S. H. A. Lavasani and A. Medi, “Implicit common-mode resonance by parasitic capacitances in LC oscillators for Ka-band satellite receiver” *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 12, pp. 8458–8462, Nov. 2019, doi: [10.1049/joe.2018.9428](https://doi.org/10.1049/joe.2018.9428)
- [21] B. Barik, A. Kalirasu, and A. V. Prathap Kumar, “High efficient band pass filter design and analysis on impact of resonator on its performance” *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, vol. 17, no. 3, pp. 180–190, Mar. 2021.
- [22] R. Prasanna, K. Annaram, and K. Venkatalakshmi, “Reconfigurable Tri-Band UWB Antenna Using Single Winding Balun Structure” *Wirel. Pers.*

Commun., vol. 124, no. 2, pp. 1773–1787, May 2022, doi: [10.1007/s11277-021-09430-y](https://doi.org/10.1007/s11277-021-09430-y)

- [23] L. Zheng, A. Mathewson, B. O’Flynn, M. Hayes, dan S. C. O’Mathuna, “*A passive circuit based RF optimization methodology for wireless sensor network nodes*” Advanced Materials Research, vol. 267, pp. 1059–1064, June 2011, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.267.1059](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.267.1059)
- [24] Y. Huang and K. Boyle, "*Antennas: From Theory to Practice*" Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [25] International Telecommunication Union, “*Calculation of free-space attenuation*” Recommendation ITU-R P.525-5, Radiocommunication Sector of ITU, Geneva, Switzerland, Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/en>
- [26] L. Loyka and A. Kouki, “*Using Two-Ray Multipath Model for Microwave Link Budget Analysis*” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 42, no. 4, pp. 54–63, 2000.
- [27] K. Aoki and K. Honda, “*Measurement and analysis of the Rician K-factor for low-altitude UAV air-to-ground communications at 2.5 GHz*” Drones, vol. 9, no. 2, p. 86, Jan. 2025, doi: [10.3390/drones9020086](https://doi.org/10.3390/drones9020086)
- [28] J. Abraham and T. Ekman, "*Local Diversity and Ultra-Reliable Antenna Arrays*" 2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2021, pp. 1215-1221, doi: [10.1109/IEEECONF53345.2021.9723123](https://doi.org/10.1109/IEEECONF53345.2021.9723123)
- [29] T. S. Rappaport, "*Wireless Communications: Principles and Practice*" 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.
- [30] A. Traßl, E. Schmitt, T. Hößler, L. Scheuven, N. Franchi, N. Schwarzenberg, dan G. Fettweis, “*Outage prediction for ultra-reliable low-latency communications in fast fading channels*” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2021, no. 92, pp. 1–25, Mar. 2021, doi: [10.1186/s13638-021-01964-w](https://doi.org/10.1186/s13638-021-01964-w)

- [31] A. Glazunov, A. Razavi, R. Maaskant, and J. Yang, “*Semi-analytical model of the Rician K-factor*” Radio Science, vol. 55, no. 11, pp. 1–13, Nov. 2020, doi: [10.1029/2020RS007099](https://doi.org/10.1029/2020RS007099)
- [32] J. Andersson and M. Fahd, “*High frequency modeling of SMD resistors*” M.S. Thesis, Dept. of Microtechnology and Nanoscience, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2024.
- [33] T. W. Alhidayatuddiniyah dan S. P. Astuti, “Pengujian hubungan reaktansi induktif pada induktor terhadap perubahan frekuensi sumber arus dengan LED sebagai indikator” Navigation Physics: Journal of Physics Education, vol. 3, no. 2, pp. 59–65, Des. 2021.
- [34] G. R. Choi, H. Kim, Y. Hong, J. Hwang, E. Kim, and W. Nah, “*Near-field coupling effect analysis of SMD inductor using 3D-EM model*” Electronics, vol. 12, no. 13, p. 2845, Jun. 2023, doi: [10.3390/electronics12132845](https://doi.org/10.3390/electronics12132845)
- [35] Exxelia, “*Ceramic capacitors product catalog*” Catalog No. 211_SD_12-24, Feb. 2021. Exxelia: Paris, France. [Online]. Available: <https://bitly.cx/6yla1>
- [36] H. Kusnadi, Amrullah, E. Affandi, dan I. U. Pradifta, “Simulasi teknologi jembatan otomatis pada jalur kapal laut dengan mikrokontroler ATmega 8”, Jurnal Mesil (Mesin Elektro Sipil), vol. 3, no. 1, pp. 31–38, Jun. 2022., doi: [10.53695/jm.v3i1.696](https://doi.org/10.53695/jm.v3i1.696)
- [37] L. Xu, D. Blaauw, and D. Sylvester, “*Ultra-low power 32 kHz crystal oscillators: Fundamentals and design techniques*” IEEE Open Journal of Solid-State Circuits Society, vol. 1, pp. 79–96, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/OJSSCS.2021.3113889>
- [38] R. N. Kaikatui and R. Corputty, “*Design of microstrip patch antenna rectangular at 2400 MHz for LTE applications*” Journal of Scientific Research and Development (JSCR), vol. 4, no. 2, pp. 419–425, Dec. 2022.
- [39] M. S. Yahya, S. Soeung, S. K. A. Rahim, U. Musa, S. S. Ba Hashwan, Z. Yunusa, and S. A. Hamzah, “*LoRa microstrip patch antenna: A comprehensive review*” Alexandria Engineering Journal, vol. 103, pp. 197–

226, Jan. 2024, doi: [10.1016/j.aej.2023.10.018](https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.018)

- [40] I. Jaya, C. M. O. Mustiko, and A. Zainuddin, “Desain dan Implementasi Antena Telex 2x5/8λ untuk Aplikasi Sistem Penyiaran Radio FM” *Dielektrika*, vol. 3, no. 1, pp. 34–44, 2016.
- [41] M. I. Amal, F. Hadary, and B. W. Sanjaya, “Implementasi robot terbang *quadcopter* berbasis *flight controller* Pixhawk dalam melakukan monitoring karbon monoksida di Jalan Sepakat 2 Kota Pontianak” *INTEGRATE: Industrial Engineering and Management System*, vol. 9, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jtinUNTAN/issue/view/2594>
- [42] K. Yang, G. Y. Yang, and S. I. H. Fu, “*Research of control system for plant protection UAV based on Pixhawk*” in *Proc. 3rd Int. Conf. Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR)*, Wuhan, China, pp. 371–375, 2019, doi: [10.1016/j.procs.2020.02.082](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.082)
- [43] K. Kamal, F. Firdayanti, U. M. Tyas, A. A. Buckhari, dan Pattasang, “Implementasi aplikasi Arduino IDE pada mata kuliah sistem digital” *Jurnal Teknologi dan Pembelajaran*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, Apr. 2023.
- [44] R. S. Saputra, “*Development of learning media simulation of automatic garden lights using the Proteus application*” *International Journal of Research in Community Service*, vol. 3, no. 2, pp. 71–77, 2022.
- [45] Syahminan, “Pengembangan pembelajaran teknik digital dengan media perangkat lunak Proteus dan emulator” *Jurnal SPIRIT*, vol. 12, no. 2, pp. 41–45, Nov. 2020.
- [46] M. R. Meidiansyah, K. Oktavianingsih, A. Afiyanti, and V. Frendiana, “Penyelesaian *plotting Smithchart* untuk impedansi input dengan pemrograman berbasis GUI *Python*” *Jurnal Ilmu Teknik dan Komputer (JITKOM)*, vol. 8, no. 2, pp. 81–85, Jul. 2024, doi: [10.22441/jitkom.v8i2.001](https://doi.org/10.22441/jitkom.v8i2.001)
- [47] SYIFAUL FUADA *et al.*, “Studi *EasyEDA* sebagai Alternatif Simulator Rangkaian Listrik: Pengujian pada Rangkaian *Mesh* dan Pembuktiannya

- dengan Eksperimen Aktual” ALINIER J. Artif. Intell. Appl, vol. 4, no. 2, pp. 79–90, Nov. 2023, doi: [10.36040/alinier.v4i2.6935](https://doi.org/10.36040/alinier.v4i2.6935)
- [48] H. M. Maulidiah, B. Budiana, W. R. Puspita, A. Jefiza, and M. Mustanir, “*Study of Lead-Free Solder Joint Reliability*” J. Integr, vol. 14, no. 1, pp. 30–34, Apr. 2022, doi: [10.30871/ji.v14i1.3910](https://doi.org/10.30871/ji.v14i1.3910)
- [49] R. B. Kurnia *et al.*, “Perancangan Solder *Reflow* Model Plat Berbasis Kontrol Logika *Fuzzy* Menggunakan ESP32” J. Elkolind, vol. 11, no. 2, 2024, doi: [10.33795/elkolind.v11i2.3339](https://doi.org/10.33795/elkolind.v11i2.3339)
- [50] M. Drienovsky, M. Palcut, P. Priputen, E. Cuninková, O. Bošák, M. Kubliha, and L. Rízeková Trnková, “*Properties of Sn-Ag-Cu solder joints prepared by induction heating*” Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2020, Article ID 1724095, 9 pp., Mar. 2020, doi: [10.1155/2020/1724095](https://doi.org/10.1155/2020/1724095)
- [51] D. J. Suroso, M. Arifin, and P. Cherntanomwong, “*Distance-based indoor localization system utilizing general path loss model and RSSI*” J. Robot. Control, vol. 1, no. 6, pp. 199–207, Nov. 2020, doi: [10.18196/jrc.1638](https://doi.org/10.18196/jrc.1638)
- [52] B. B. Rijadi and A. R. Machdi, “*Distance testing on point-to-point communication with LoRa based on RSSI and log normal shadowing model*” Journal of Energy and Electrical Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 89–93, Apr. 2024.
- [53] B. S. Goshu, “*Enhancing Communication Performance: Addressing Propagation Effects and Noise Sources*” Budapest Int. Res. Exact Sci. J, vol. 06, no. 04, pp. 240–253, 2024, doi: [10.33258/birex.v6i4.8001](https://doi.org/10.33258/birex.v6i4.8001)
- [54] JLCPCB, “*Controlled impedance calculator*” JLCPCB, 2025. [Online]. Available: <https://jlcpcb.com/pcb-impedance-calculator>.
- [55] Espressif Systems, “*ESP32 Demo Board V2 Schematic*” Espressif Systems, 1 Agustus 2016. [Online]. Tersedia: https://dl.espressif.com/dl/schematics/ESP32-Demo-Board-V2_sch.pdf