

**IMPLEMENTASI PERANGKAT DAN ANALISIS DATA GAS ANALYZER
PEMANTAUAN EMISI KARBON DI PERKEBUNAN KELAPA
SAWIT LAHAN GAMBUT**

(Skripsi)

Oleh

Aldi Rifqi

2115031069



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

**IMPLEMENTASI PERANGKAT DAN ANALISIS DATA GAS ANALYZER
PEMANTAUAN EMISI KARBON DI PERKEBUNAN KELAPA
SAWIT LAHAN GAMBUT**

Oleh

ALDI RIFQI

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

IMPLEMENTASI PERANGKAT DAN ANALISIS DATA GAS ANALYZER PEMANTAUAN EMISI KARBON DI PERKEBUNAN KELAPA SAWIT LAHAN GAMBUT

Oleh

Aldi Rifqi

Perubahan iklim akibat peningkatan CO₂ dan CH₄ menjadikan ekosistem gambut, khususnya yang menjadi lahan perkebunan kelapa sawit, sebagai prioritas pemantauan emisi. Pemantauan yang kredibel untuk kebutuhan *monitoring-reporting-verification* (MRV) menuntut integrasi multi-sensor (gas dan mikroklimat) yang pada sebuah menara meteorologi statis. Namun, tata letak antar sensor di menara kerap berjauhan (puluhan meter) untuk pengukuran pada ketinggian yang berbeda, sementara antarmuka I²C dan UART pada instrumen riset umumnya dibatasi jarak kabel pendek dan rentan degradasi sinyal. Keterbatasan jarak ini menghambat sinkronisasi data dan meningkatkan *downtime*. Penelitian ini menerapkan I²C extender dan UART extender guna memperluas jangkauan komunikasi sensor, sekaligus menganalisis hubungan emisi CO₂ dengan variabel lingkungan menggunakan tiga pendekatan korelasi (Spearman, Kendall Tau, dan *distance correlation*). Uji lapangan dilakukan di PT Persada Dinamika Lestari, Kalimantan Selatan, menggunakan Gas Analyzer dan Microclimate Station. Ekstender berhasil memperluas jangkauan hingga 20 m dengan latensi rata-rata 74,33 ms, *jitter* 0,69 ms, dan keberhasilan akuisisi 99,90%. Secara operasional, latensi <100 ms dan *jitter* sub-ms memadai untuk akuisisi 1 Hz–10 Hz, sehingga kesinambungan data untuk MRV tetap terjaga. Analisis korelasi menunjukkan CO₂ berasosiasi negatif dengan suhu, tekanan, uap air, dan radiasi matahari, konsisten dengan penurunan konsentrasi siang hari akibat penyerapan fotosintetik dan pengenceran *boundary layer*, serta positif dengan kelembapan relatif, mencerminkan akumulasi malam hari saat lapisan permukaan stabil. Hubungan dengan CH₄, curah hujan, dan kecepatan angin lemah/tidak signifikan, menandakan perbedaan skala proses dan kontrol hidrologi yang berbeda. Di antara metode yang diuji, Spearman paling efektif mengungkap hubungan monotonik lintas rentang pengamatan, sementara *distance correlation* membantu menandai kemungkinan ketidaklinieran lemah. Temuan ini menunjukkan bahwa skema ekstender I²C/UART yang rendah biaya, berlatensi rendah, dan andal dapat menskalakan jaringan sensor di lahan gambut, sekaligus memperkaya interpretasi proses melalui analisis korelasi multi-metode untuk mendukung strategi mitigasi emisi yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Emisi karbon, Gas Analyzer, Microclimate, I²C Extender, UART extender, Korelasi data emisi

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF MONITORING EQUIPMENT AND DATA ANALYSIS OF GAS ANALYZERS FOR CARBON EMISSIONS IN PEATLAND OIL PALM PLANTATIONS

By

Aldi Rifqi

Rising concentrations of CO₂ and CH₄ make peatland ecosystems, especially oil palm plantations, priorities for emission monitoring. Credible Monitoring–Reporting–Verification (MRV) requires integrated multi-sensor networks (gas and microclimate) on a fixed meteorological tower. In practice, sensors on such towers are separated by tens of meters to sample different heights, while I²C and UART interfaces are limited to short cable runs and are susceptible to signal degradation, hindering synchronization and increasing downtime. This study implements I²C and UART extenders to overcome distance constraints and analyzes relationships between CO₂ and environmental variables using three correlation approaches: Spearman, Kendall Tau, and distance correlation. Field tests were conducted at PT Persada Dinamika Lestari, South Kalimantan, employing a Gas Analyzer and a Microclimate Station. The extenders expanded communication range to 20 m with average latency of 74.33 ms, jitter of 0.69 ms, and a data-acquisition success rate of 99.90%. Operationally, latency under 100 ms and sub-millisecond jitter are adequate for 1–10 Hz acquisition, preserving MRV continuity. Correlation analysis shows that CO₂ is negatively associated with air temperature, pressure, water vapor, and solar radiation, consistent with daytime drawdown from photosynthetic uptake and boundary-layer dilution, and positively associated with relative humidity, reflecting nocturnal accumulation under stable surface layers. Relationships with CH₄, rainfall, and wind speed were weak or not significant, indicating different process scales and hydrological controls. Among the three methods, Spearman most effectively identified monotonic associations across the observation range, whereas distance correlation highlighted weak nonlinearity that rank-based metrics may understate. These results demonstrate that a low-cost, low-latency, and reliable I²C/UART-extender scheme can scale sensor networks on peatland towers and strengthen the interpretability of multi-sensor carbon monitoring. The approach offers a practical pathway to precise and adaptive emissions surveillance in tropical peatlands and supports sustainable mitigation strategies within oil palm landscapes.

Keywords: Carbon emissions, Gas Analyzer, Microclimate, I²C extender, UART extender, Emission data correlation.

Judul Skripsi : **IMPLEMENTASI PERANGKAT DAN ANALISIS DATA GAS ANALYZER PEMANTAUAN EMISI KARBON DI PERKEBUNAN KELAPA SAWIT LAHAN GAMBUT**

Nama Mahasiswa : **Aldi Rifqi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2115031069**

Program Studi : **Teknik Elektro**

Fakultas : **Teknik**



Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Ing. 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

Ketua Program Studi
Teknik Elektro


Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 19710314 199903 2 001


Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 19731104 200003 1 001

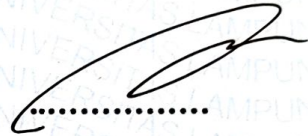
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



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



Penguji : Ing. Melvi, S.T., M.T., Ph.D.



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 19750928200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 29 Juli 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, 25 Agustus 2025



Aldi Rifqi

NPM 2115031069

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Baturaja pada tanggal 1 Maret 2003. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Rustan Alwi dan Ibu Yupri Yanti.

Pendidikan formal penulis dimulai dari PAUD Nadya Al-Mansyur pada tahun 2008–2009, kemudian melanjutkan ke SDN 1 OKU (2009–2015), SMPN 1 OKU (2015–2018), dan SMAN 1 OKU (2018–2021). Pada tahun 2021, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam berbagai organisasi dan kegiatan akademik, antara lain di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Divisi Kerohanian 2022 dan Divisi Sosial 2023), Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik (Staff Pengembangan Strategis dan Inovatif 2023), serta Society of Renewable Energy Universitas Lampung (Staff Public Relation 2023). Penulis juga berpartisipasi sebagai volunteer batch 1 di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Universitas Lampung. Dalam bidang akademik, penulis mengambil konsentrasi Telekomunikasi dan Teknologi Informasi, aktif sebagai asisten praktikum, serta mengikuti Program Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB) di PT Bisa Artificial Indonesia dengan fokus pada Data Science. Penulis menjadi penerima pendanaan PPK Ormawa 2023 dengan tema Smart Tambak Udang dan meraih Juara 2 Poster Terbaik Abdidaya Ormawa 2023. Penulis juga berpartisipasi dalam penelitian pemantauan emisi karbon di perkebunan kelapa sawit Kalimantan Selatan serta penelitian di kawasan Hutan Mangrove Petengoran.

PERSEMBAHAN



Alhamdulillahirobbil'alamin, Atas Izin Allah SWT yang Maha Kuasa
Teriring shalawat serta salam Kepada Nabi Muhammad SAW

KUPERSEMBAHKAN KARYA INI UNTUK

Ayah & Ibu Tercinta

Rustan Alwi & Yupri Yanti

Abang & Adik Tersayang

Afif Ramadhan & Alfina Rista

yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, semangat, serta pengorbanan tiada henti dalam setiap langkah hidup penulis. Ucapan terima kasih yang tak terhingga penulis sampaikan atas ketulusan, cinta, dan pengorbanan tanpa batas yang selalu menjadi sumber kekuatan dan inspirasi dalam perjalanan ini.

Diri Sendiri

Aldi Rifiqi

sebagai bentuk penghargaan atas segala perjuangan, kesabaran, dan keyakinan untuk terus melangkah hingga karya ini terselesaikan. Terima kasih telah mampu bertahan, bangkit, serta berusaha istiqamah dalam setiap proses yang dijalani. Bismillah, semoga karya ini menjadi pijakan awal menuju langkah-langkah besar berikutnya.

MOTTO

حَسْبُنَا اللَّهُ وَنِعْمَ الْوَكِيلُ

“Cukuplah Allah (menjadi penolong) bagi kami dan Dia sebaik-baik pelindung.”

(Q.S. Ali 'Imran:173)

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

“Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.”

(Q.S. Al-Insyirah: 6)

“Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia”

(HR. Ahmad, ath-Thabrani, ad-Daruqutni)

“Improving by 1% isn’t particularly notable, sometimes it isn’t even noticeable, but it can be far more meaningful – especially in the long run.”

(James Clear)

"When life gets you down, you know what you gotta do? Just keep swimming, just keep swimming, just keep swimming, swimming, swimming."

(Dory, Finding Nemo)

“Sedikit lebih baik daripada tidak sama sekali.”

(Penulis)

SANWACANA

Alhamdulillahirobbil'alamin, segala puji dan syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang kita nantikan syafaatnya di hari akhir kelak.

Skripsi dengan judul **“Implementasi Perangkat dan Analisis Data Gas Analyzer Pemantauan Emisi Karbon di Perkebunan Kelapa Sawit Lahan Gambut”** ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama pelaksanaan penelitian dan penulisan skripsi ini, penulis mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah subhanahu wa ta'ala yang telah memberikan rahmat, karunia, rezeki, kemudahan, dan ilmu-Nya kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Ayah Rustan Alwi dan Ibu Yupri Yanti, yang selalu mendoakan, membimbing, dan berjuang demi kehidupan serta masa depan penulis, sehingga penulis dapat menempuh pendidikan hingga tahap ini. Doa, kasih sayang, dan pengorbanan kalian senantiasa menjadi sumber kekuatan dalam setiap langkah penulis. Gelar ini bukan hanya milik penulis, tetapi juga milik Ayah dan Ibu, yang telah berhasil membesarkan, mendidik, dan menemani penulis sepanjang perjalanan ini.
3. Abang Afif Ramadhan dan adik Alfina Rista, yang telah memberikan motivasi, dukungan, serta semangat selama penulis menempuh perkuliahan.

4. Bapak Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing utama sekaligus Kepala Laboratorium Telekomunikasi dan Teknologi Informasi, yang dengan penuh perhatian telah membimbing, mengarahkan, serta memberikan ilmu dan motivasi yang sangat berharga kepada penulis.
5. Bapak Mona Arif Muda, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing pendamping, yang senantiasa memberikan bimbingan, arahan, masukan, serta motivasi yang membangun kepada penulis.
6. Ibu Ing. Melvi, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen penguji, yang dengan penuh perhatian telah memberikan nasihat, arahan, motivasi, serta kritik dan saran yang membangun kepada penulis.
7. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung
8. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
9. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
10. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
11. Ibu Dr. Sri Purwiyanti, ST, MT, Ph.D selaku dosen pembimbing akademik.
12. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, atas segala ilmu, bimbingan, serta bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menjalani masa studi.
13. Kak Nora Aditiyan, S.T., selaku Pranata Laboratorium Pendidikan konsentrasi Telti, yang telah berbagi pengalaman, ilmu, solusi, serta masukan berharga kepada penulis.
14. Teman baik dan rekan seperjuangan, Afni, Sofya, Wisnu, dan Rizky, yang senantiasa kebersamai, membantu, serta memberikan semangat kepada penulis, sekaligus menjadi bagian dari tim yang bersama-sama berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.
15. Tim ECS 22 dan 23 yang selalu mendukung, kebersamai, serta membantu penulis dalam berbagai kegiatan.

16. Partner penelitian, Akmal, yang telah membantu, kebersamai, dan memberikan solusi kepada penulis, serta tim MCS 21 dan 22 turut memberikan bantuan.
17. Tim PUMMA 21, yang selalu menghadirkan canda tawa, semangat, serta masukan berharga kepada penulis.
18. Keluarga besar konsentrasi Telekomunikasi dan Teknologi Informasi, yang telah berbagi ilmu, saran, dan masukan kepada penulis.
19. Keluarga besar Teknik Elektro 2021 (Excalto) dan Himatro Unila, yang telah kebersamai, berbagi ilmu, pengalaman, dan kesempatan berharga kepada penulis.
20. Kepada jodoh yang telah ditetapkan di Lauhul Mahfudz, yang tanpa disadari menjadi penyemangat bagi penulis untuk berbenah, memantaskan diri, dan istiqomah hingga Allah mempertemukan pada waktunya.
21. Diri sendiri, Aldi Rifqi, atas kesabaran, kerja keras, serta keteguhan untuk terus berjuang dengan doa dan harapan, hingga akhirnya penelitian ini dapat terselesaikan.
22. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini.

Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis hingga terselesainya skripsi ini. Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis terbuka untuk menerima kritik, saran, dan masukan yang membangun dari berbagai pihak. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis, pembaca, dan pihak-pihak yang berkepentingan, serta menjadi amal yang bermanfaat.

Bandar Lampung, 25 Agustus 2025

Penulis,

Aldi Rifqi
NPM 2115031069

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Manfaat Penelitian	5
1.7 Sistematika Penulisan.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Penelitian Terdahulu.....	8
2.2 Emisi Karbon di Lahan Gambut dan Non-Gambut.....	12
2.3 Metode <i>Eddy Covariance</i>	12
2.4 Gas Analyzer	15
2.5 3D Anemometer	16
2.6 <i>Microclimate Station</i>	17
2.7 <i>Microcontroller</i>	18
2.8 Sensor CO ₂	19
2.9 Sensor CH ₄	19
2.10 Sensor Suhu dan Kelembapan Relatif.....	20
2.11 Sensor Tekanan Barometrik	20
2.12 <i>I2C Extender</i>	21
2.13 <i>UART Extender</i>	22
2.14 <i>Exploratory Data Analysis (EDA)</i>	24
2.15 <i>Preprocessing Data</i>	24
2.16 Analisis Normalitas Data.....	26

2.16.1 Anderson-Darling.....	27
2.16.2 D'Agostino	27
2.16.3 Shapiro-Wilk	27
2.17 Alat dan Platform Pemrosesan Data.....	28
2.17.1 Python	28
2.17.2 Google Colab	28
2.17.3 Jupyter Notebook	29
2.18 Korelasi Spearman	29
2.19 Korelasi Kendall Tau.....	31
2.20 Korelasi Distance	31
III. METODE PENELITIAN	33
3.1 Waktu Penelitian	33
3.2 Deskripsi Lokasi dan Kriteria Pemilihan	33
3.2.1 Laboratorium Telekomunikasi Universitas Lampung.....	33
3.2.2 PT. Persada Dinamika Lestari <i>Plantation</i>	34
3.3 <i>Capstone Project</i>	34
3.4 Kerangka Kerja Penelitian	36
3.5 Pengembangan Perangkat	38
3.5.1 <i>Gas Analyzer</i>	39
3.5.2 3D Anemometer	44
3.5.3 <i>Microclimate Station</i>	47
3.6 Prosedur Implementasi.....	49
3.6.1 Instalasi Perangkat	50
3.6.2 Protokol Pengumpulan Data	52
3.7 Metodologi Analisis Data.....	53
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	56
4.1 Implementasi Perangkat	56
4.2 Evaluasi Kinerja Perpanjangan Komunikasi Sensor.....	58
4.2.1 Hasil Uji Latensi	58
4.2.2 Hasil Uji Interval Sensing.....	60
4.2.3 Hasil Uji Jitter Sensing.....	62
4.3 Analisis Data Profil Emisi.....	63
4.3.1 <i>Capturing</i> Data.....	64
4.3.2 Resampling Data	65
4.3.3 Exploratory Data Analysis (EDA)	65
4.3.4 <i>Preprocessing</i> Data	69

4.3.5 Imputasi Data	70
4.3.6 Uji Normalitas Data	76
4.4 Analisis Data Parameter Cuaca	78
4.4.1 <i>Capturing</i> Data.....	78
4.4.2 Exploratory Data Analysis (EDA)	79
4.4.3 <i>Preprocessing</i> Data	82
4.4.4 Imputasi Data	83
4.4.5 Uji Normalitas Data	89
4.4.6 <i>Time slicing</i> Data.....	90
4.5 Korelasi Data Emisi dengan Faktor Lingkungan	92
4.5.1 Hasil Uji Korelasi Spearman.....	92
4.5.2 Hasil Uji Korelasi Kendall Tau	94
4.5.3 Hasil Uji Korelasi Distance.....	97
V. KESIMPULAN DAN SARAN	100
5.1 Kesimpulan	100
5.2 Saran.....	101
DAFTAR PUSTAKA.....	103
LAMPIRAN.....	106

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Aliran Udara dalam Ekosistem	13
Gambar 2.2 Prinsip dasar Metode eddy covariance	14
Gambar 2.3 Gas Analyzer	16
Gambar 2.4 3D Anemometer	17
Gambar 2.5 Microclimate Station	18
Gambar 3.1 Diagram Capstone Project Eddy Covariance Station (ECS).....	35
Gambar 3.2 Diagram Alir Kerangka Kerja Penelitian	37
Gambar 3.3 Diagram Blok Gas Analyzer Versi 1	39
Gambar 3.4 Diagram Blok Gas Analyzer Versi 2	40
Gambar 3.5 Diagram Blok Gas Analyzer Versi 2 bagian Daya	41
Gambar 3.6 Diagram Blok Gas Analyzer Versi 3	43
Gambar 3.8 Diagram Blok 3D Anemometer Versi 1	45
Gambar 3.9 Diagram Blok 3D Anemometer Versi 2	45
Gambar 3.10 Diagram Blok Microclimate Station Versi 1	47
Gambar 3.11 Diagram Blok Microclimate Station Versi 2	48
Gambar 3.12 Diagram Alir Instalasi Perangkat	50
Gambar 3.13 Diagram Alir Analisis Data	54
Gambar 4.1 Implementasi Perangkat di Kalimantan	56
Gambar 4.2 Implementasi Perpanjangan Komunikasi Sensor di Petengoran.....	57
Gambar 4.3 Latensi tanpa Extender (3m)	59
Gambar 4.4 Latensi dengan Extender (20m)	59
Gambar 4.5 Interval Sensing tanpa Extender (3m).....	60
Gambar 4.6 Interval Sensing dengan Extender (20m).....	61
Gambar 4.7 Jitter Sensing tanpa Extender (3m)	62
Gambar 4.8 Jitter Sensing dengan Extender (20m)	63
Gambar 4.9 Struktur Data Frame	66
Gambar 4.10 Visualisasi Data CO2.....	72
Gambar 4.11 Visualisasi Data Temperature 1	73
Gambar 4.12 Visualisasi Data <i>Humidity</i>	73
Gambar 4.13 Visualisasi Data H2O	74
Gambar 4.14 Visualisasi Data Pressure sesudah Preprocessing	75
Gambar 4.15 Visualisasi Data Temperature 2	75
Gambar 4.16 Visualisasi Data CH4.....	76
Gambar 4.17 Struktur Data Frame	80
Gambar 4.18 Visualisasi Data Rainfall	84
Gambar 4.19 Visualisasi Data Temperature	85
Gambar 4.20 Visualisasi Data Pyrano.....	86

Gambar 4.21 Visualisasi Data Humidity.....	86
Gambar 4.22 Visualisasi Data Wind Speed.....	87
Gambar 4.23 Visualisasi Data Angle sesudah Preprocessing	88
Gambar 4.24 Visualisasi Data Arah dan Kecepatan Angin.....	88

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.7 Klasifikasi koefisien korelasi	30
Tabel 4.1 Perhitungan Statistik Deskriptif	66
Tabel 4.2 Jumlah Missing Values	67
Tabel 4.3 Jumlah Outlier	68
Tabel 4.4 Jumlah NaN (Not a Number)	69
Tabel 4.5 Uji Normalitas Data	77
Tabel 4.6 Perhitungan Statistik Deskriptif	80
Tabel 4.7 Jumlah Missing Values	81
Tabel 4.8 Jumlah Outlier	82
Tabel 4.9 Jumlah NaN (Not a Number)	83
Tabel 4.10 Uji Normalitas Data	90
Tabel 4.11 Hasil Uji Korelasi Spearman	93
Tabel 4.12 Hasil Uji Korelasi Kendall Tau	95
Tabel 4.13 Hasil Uji Korelasi Distance	97

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim dan meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4), telah menjadi perhatian utama di tingkat global. Gas-gas ini memainkan peran penting dalam pemanasan global, yang berdampak pada ekosistem, pola cuaca, dan kehidupan manusia secara keseluruhan. Lahan gambut, yang sering digunakan untuk perkebunan kelapa sawit, memiliki kapasitas menyimpan karbon yang sangat besar [1]. Namun, aktivitas manusia seperti pengeringan lahan, pembukaan lahan, dan praktik pertanian intensif dapat menyebabkan pelepasan karbon dalam jumlah besar ke atmosfer.

Perkebunan kelapa sawit di Indonesia, khususnya di lahan gambut, menjadi salah satu sektor yang disoroti dalam isu emisi karbon. Sebagai salah satu produsen kelapa sawit terbesar di dunia, Indonesia menghadapi tantangan untuk menjaga keseimbangan antara produktivitas perkebunan dan keberlanjutan lingkungan [2]. Lahan gambut yang kaya akan bahan organik berpotensi menjadi sumber utama emisi gas rumah kaca jika tidak dikelola dengan baik [3]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan ilmiah yang komprehensif untuk memahami dan memitigasi dampak emisi karbon dari aktivitas perkebunan. Pendekatan ini melibatkan pengembangan teknologi pengukuran yang akurat dan analisis data yang dapat memberikan informasi mendalam untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data di sektor perkebunan kelapa sawit.

Metode *Eddy Covariance* merupakan salah satu pendekatan yang digunakan secara global untuk mengukur fluks karbon secara langsung dan *real-time*. Teknik ini

memanfaatkan hubungan antara fluktuasi kecepatan angin dan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer untuk menghitung aliran karbon di antara permukaan tanah dan atmosfer. Dengan keunggulan dapat mengukur fluks karbon tanpa memerlukan asumsi tambahan atau model empiris, metode ini memungkinkan pengukuran yang akurat di berbagai ekosistem, termasuk lahan gambut. Implementasi metode ini memerlukan perangkat yang mampu merekam berbagai parameter lingkungan, seperti konsentrasi gas, kecepatan angin, suhu, kelembapan, dan tekanan udara secara simultan [4].

Selain pengukuran fluks karbon, analisis hubungan antara data emisi dan faktor lingkungan sangat penting untuk menggali lebih dalam faktor-faktor yang mungkin mempengaruhi emisi gas rumah kaca di lapangan. Faktor-faktor seperti suhu, kelembapan, tekanan udara, curah hujan, radiasi matahari, dan kecepatan angin berpotensi mempengaruhi fluks karbon, meskipun hubungan antara emisi karbon dan faktor-faktor lingkungan tersebut masih perlu dianalisis lebih lanjut untuk mengonfirmasi pengaruhnya. Untuk menganalisis hubungan ini, teknik statistik seperti Spearman, Kendall Tau, dan Distance Correlation digunakan untuk mengidentifikasi hubungan yang ada antara variabel-variabel ini. Pengetahuan yang diperoleh dari analisis tersebut dapat memberikan wawasan mengenai faktor lingkungan mana yang memiliki potensi berkontribusi pada emisi karbon, serta bagaimana perubahan kondisi lingkungan dapat mempengaruhi tingkat emisi gas rumah kaca.

Peneliti di Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, telah melakukan inovasi penting dalam pengembangan perangkat *Eddy Covariance Station* (ECS), yang dirancang untuk mengukur emisi karbon secara akurat. Perangkat ECS terdiri dari tiga komponen utama, yaitu *Gas Analyzer* untuk analisis emisi karbon, Anemometer Tiga Dimensi (3D Anemometer) untuk pengukuran kecepatan angin, dan Stasiun Pengukuran Iklim Mikro (*Microclimate Station* - MCS) untuk memantau parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, curah hujan, radiasi matahari, dan kecepatan angin. Meskipun demikian, implementasi perangkat Gas Analyzer di lapangan menghadapi tantangan terkait keterbatasan jarak komunikasi sensor. Sistem komunikasi standar, seperti protokol I2C, memiliki keterbatasan panjang kabel maksimal 1–3 meter, sehingga sensor harus dipasang berdekatan

dengan *mainboard case*. Masalah serupa juga ditemukan pada protokol komunikasi UART, yang tidak dirancang untuk transfer data jarak jauh tanpa kehilangan kualitas sinyal.

Untuk mengatasi tantangan ini, peneliti menerapkan teknologi I2C *extender* dan UART *extender* sebagai solusi. I2C *extender* memungkinkan komunikasi sensor pada jarak yang lebih jauh tanpa mengorbankan kecepatan atau akurasi data [5]. Sementara itu, UART *extender* mendukung transfer data jarak jauh dengan stabilitas sinyal yang lebih baik [6]. Dengan teknologi ini, sensor dapat dipasang pada ketinggian yang lebih tinggi, sementara *mainboard case* tetap berada di bawah. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan fleksibilitas pemasangan perangkat, tetapi juga memastikan data pengukuran parameter lingkungan menjadi lebih akurat dan optimal untuk mendukung pengukuran emisi karbon.

Penelitian ini akan membahas pengembangan dan implementasi perangkat Gas Analyzer di perkebunan kelapa sawit PT Persada Dinamika Lestari, Kalimantan Selatan, serta evaluasi penggunaan I2C *extender* dan UART *extender* untuk meningkatkan fleksibilitas penempatan sensor. Penelitian ini juga akan mengeksplorasi analisis hubungan antara data emisi dan faktor lingkungan untuk memberikan wawasan lebih dalam mengenai pengelolaan emisi karbon yang lebih efektif di sektor perkebunan kelapa sawit, khususnya di lahan gambut.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana implementasi teknologi I2C *extender* dan UART *extender* dapat mengatasi keterbatasan jarak komunikasi sensor untuk optimalisasi penempatan perangkat pada kondisi lapangan?
2. Bagaimana analisis korelasi hubungan antara data emisi yang diperoleh dari perangkat Gas Analyzer dan parameter lingkungan yang diukur oleh Microclimate Station dapat mengungkap pengaruh faktor-faktor lingkungan terhadap emisi gas rumah kaca di lapangan?

3. Metode korelasi mana yang paling efektif antara Spearman, Kendall Tau, atau Distance dalam menganalisis hubungan antara emisi karbon dan faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhinya?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menerapkan teknologi I2C *extender* dan UART *extender* untuk mengatasi keterbatasan jarak komunikasi sensor, sehingga memungkinkan optimalisasi penempatan perangkat pada kondisi lapangan.
2. Menganalisis korelasi hubungan antara data emisi yang diperoleh dari Gas Analyzer dan parameter lingkungan yang diukur oleh Microclimate Station, guna mengidentifikasi pengaruh faktor-faktor lingkungan terhadap emisi gas rumah kaca di lapangan.
3. Menentukan metode korelasi yang paling tepat antara Spearman, Kendall Tau, dan Distance untuk menganalisis hubungan antara emisi karbon dan faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhinya.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini berfokus pada pengembangan, implementasi, dan analisis perangkat *Eddy Covariance Station* (ECS) untuk pengukuran emisi karbon di perkebunan kelapa sawit pada lahan gambut. Perangkat ECS meliputi *Gas Analyzer*, 3D Anemometer, dan *Microclimate Station* (MCS). Teknologi I2C *extender* dan UART *extender* diterapkan untuk mengatasi keterbatasan jarak komunikasi sensor, memungkinkan konfigurasi optimal di lapangan. Instalasi perangkat dilakukan di perkebunan kelapa sawit PT Persada Dinamika Lestari, Kalimantan Selatan, dengan data yang mencakup konsentrasi gas rumah kaca, kecepatan angin, suhu, kelembapan, tekanan udara, arah angin, radiasi matahari, dan curah hujan.

Selain itu, penelitian ini juga mencakup analisis korelasi hubungan antara data emisi yang diperoleh dari Gas Analyzer dan parameter lingkungan yang diukur oleh

Microclimate Station. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh faktor-faktor lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan tekanan udara, terhadap emisi gas rumah kaca yang tercatat di lapangan, serta untuk memberikan pemahaman lebih dalam mengenai hubungan antara variabel-variabel tersebut dalam konteks perubahan iklim dan pengelolaan lingkungan.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan perangkat *Eddy Covariance Station* (ECS) hanya dijelaskan secara garis besar, sementara detail teknis pengembangan perangkat akan dibahas secara terpisah oleh tim peneliti lain.
2. Implementasi perangkat dan data yang dibahas hanya berdasarkan studi kasus di perkebunan kelapa sawit PT Persada Dinamika Lestari, Kalimantan Selatan, dan tidak mencakup perkebunan lain atau lahan non-gambut.
3. Optimalisasi komunikasi sensor difokuskan pada penggunaan teknologi I2C extender dan UART *extender* untuk mengatasi keterbatasan jarak komunikasi kabel, dengan analisis data yang mencakup parameter latensi, interval, jitter, dan data loss.
4. Analisis korelasi hubungan antara data emisi dan faktor lingkungan hanya dilakukan dengan data dari Gas Analyzer dan Microclimate Station di lokasi studi, tanpa membandingkan dengan data eksternal atau lokasi lain. Evaluasi metode korelasi terbatas pada metode Spearman, Kendall Tau, dan Distance.
5. Data yang dianalisis dalam penelitian ini dikumpulkan selama periode enam bulan, mulai dari 10 Juni 2024 hingga 31 Desember 2024.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan berbagai manfaat di bidang akademis, teknologi, lingkungan, dan praktis. Secara akademis, penelitian ini dapat menambah wawasan dalam bidang pengukuran emisi karbon, khususnya di perkebunan kelapa sawit pada lahan gambut menggunakan metode *Eddy*

Covariance, serta memberikan kontribusi pada pengembangan perangkat pengukuran karbon berbasis teknologi yang efisien dan akurat. Selain itu, penelitian ini juga memberikan kontribusi dalam analisis korelasi hubungan antara data emisi dan faktor lingkungan, yang dapat memperdalam pemahaman mengenai pengaruh faktor-faktor lingkungan terhadap emisi karbon di lapangan.

Dari sisi teknologi, penelitian ini memperkenalkan solusi optimalisasi jarak komunikasi sensor dengan teknologi *I2C extender* dan *UART extender*, yang dapat menjadi referensi dalam pengembangan perangkat serupa. Di bidang lingkungan, penelitian ini memberikan data akurat yang dapat mendukung pengelolaan emisi karbon di sektor perkebunan kelapa sawit dan mendukung mitigasi perubahan iklim melalui pengukuran emisi karbon yang lebih terstandarisasi. Secara praktis, penelitian ini menyediakan panduan implementasi perangkat pengukuran emisi karbon di lapangan, termasuk prosedur instalasi dan pengumpulan data, serta menghasilkan data korelasi yang dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data di sektor perkebunan dan lingkungan.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini disusun untuk memberikan gambaran menyeluruh dan mempermudah pemahaman terhadap materi yang dibahas, yang dibagi ke dalam beberapa bab berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, Ruang Lingkup Penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan pada penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan mengenai teori pendukung yang menjadi pengantar pemahaman dan berkaitan dengan materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah seperti buku dan jurnal.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memaparkan metodologi penelitian antara lain waktu dan tempat pengerjaan, metode dan diagram penelitian yang akan digunakan dalam pengerjaan penelitian ini.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil dan analisa data yang didapatkan dari sistem yang dikembangkan pada penelitian ini.

V. PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan yang didapat dari hasil analisa dan pembahasan juga berisikan saran yang membangun bagi semua pihak yang terlibat dalam pelaksanaan tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

Bab ini berisikan referensi dari penulisan dan pelaksanaan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini disusun dengan mempertimbangkan sejumlah studi terdahulu. Salah satu di antaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh T. J. Griffis et al. [7], yang menggunakan metode Eddy Covariance untuk mengukur fluks karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4) pada ekosistem rawa gambut pohon palem di Amazon selama dua tahun. Pengukuran dilakukan dengan menara fluks setinggi 42 meter yang dilengkapi alat pengukur CO_2 dan CH_4 serta anemometer ultrasonik 3D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rawa gambut pohon palem di Amazon berfungsi sebagai penyerap karbon bersih dengan tingkat penyerapan CO_2 sebesar -465 hingga $-462 \text{ g C m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$, tetapi juga menjadi sumber emisi CH_4 sebesar $22 \text{ g C m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$. Variasi meteorologi seperti tekanan uap, suhu udara, dan posisi muka air tanah mempengaruhi aktivitas fotosintesis dan respirasi ekosistem. Selain itu, emisi CH_4 cenderung meningkat selama musim hujan tanpa pola harian yang signifikan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa rawa gambut Amazon merupakan penyerap karbon yang besar meskipun memiliki emisi CH_4 yang signifikan, dengan dinamika yang sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologi.

Penelitian ini relevan dengan studi yang dilakukan oleh penulis karena menunjukkan penerapan metode Eddy Covariance pada ekosistem gambut tropis, memberikan wawasan penting tentang dinamika karbon di lingkungan alami yang kompleks, seperti lahan gambut perkebunan kelapa sawit. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya pemahaman lebih dalam mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi fluks karbon, terutama terkait dengan faktor-faktor meteorologi

seperti suhu, kelembapan, tekanan udara, dan radiasi matahari. Namun, dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang fokus pada ekosistem gambut alami, penelitian yang dilakukan oleh penulis lebih berfokus pada ekosistem gambut yang terkelola, khususnya pada lahan gambut yang digunakan untuk perkebunan kelapa sawit, yang menghadapi tantangan dinamis terkait perubahan hidrologi, aktivitas pertanian, dan pengelolaan lahan. Meskipun faktor meteorologi seperti tekanan uap, suhu udara, dan muka air tanah telah diidentifikasi sebagai pengendali utama fluks karbon, penelitian ini mencoba untuk mengeksplorasi hubungan antara emisi karbon dan faktor lingkungan lain yang lebih beragam di lahan perkebunan kelapa sawit. Oleh karena itu, masih diperlukan studi lebih lanjut untuk memahami dinamika karbon secara lebih mendalam pada ekosistem gambut terkelola, termasuk analisis korelasi antara data emisi karbon dan faktor lingkungan yang diukur, yang dapat memberikan wawasan baru untuk strategi mitigasi emisi karbon yang lebih efektif dalam konteks perkebunan kelapa sawit.

Selanjutnya, penelitian oleh M. Śniadkowski [8] membahas peningkatan transmisi protokol Inter-Integrated Circuit (I2C) dalam penerapan otomasi rumah. Studi ini menggunakan pendekatan analisis dan pengujian eksperimental terhadap protokol I2C dengan kabel Cat5e dalam berbagai kondisi interferensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa protokol I2C memiliki keterbatasan dalam jarak transmisi dan cukup rentan terhadap gangguan sinyal. Beberapa solusi yang diusulkan antara lain penggunaan P82B715 dan LTC4311 untuk meningkatkan jarak transmisi, serta PCA9615 dan PCA9600 yang lebih efektif dalam meredam interferensi. Selain itu, RS-485 diidentifikasi sebagai alternatif yang lebih stabil untuk komunikasi jarak jauh dengan ketahanan gangguan yang lebih baik. Chip PCA9615 mampu mentransmisikan sinyal hingga 5 meter pada 100 kHz, sementara PCA9600/TJA1051T memungkinkan transmisi andal lebih dari 25 meter. Kesimpulannya, penggunaan rangkaian peningkatan transmisi dapat memperluas jangkauan dan meningkatkan stabilitas I2C, menjadikannya solusi hemat biaya untuk aplikasi rumah pintar. Studi ini memberikan dasar penting untuk pengembangan sistem komunikasi yang lebih efisien dan tahan gangguan.

Penelitian ini memberikan wawasan tambahan bagi penulis karena membahas solusi komunikasi sensor yang relevan dengan pengukuran emisi karbon di lingkungan yang kompleks. Dengan memanfaatkan protokol I2C yang dioptimalkan menggunakan PCA9600 dan UART menggunakan RS-485, penelitian ini menjadi dasar bagi pengembangan sistem yang andal untuk digunakan dalam kondisi lapangan yang penuh tantangan. Penelitian yang dilakukan oleh penulis bertujuan untuk mengembangkan perangkat *Eddy Covariance Station* (ECS) dengan mengintegrasikan protokol I2C yang dioptimalkan menggunakan PCA9600 dan UART menggunakan RS-485. Pendekatan ini dirancang untuk meningkatkan keandalan komunikasi sensor dan mengatasi keterbatasan jarak transmisi. Selain itu, penelitian ini akan menerapkan metode analisis spesifik untuk memastikan perangkat dapat dioptimalkan dalam penempatan lapangan, sehingga pengumpulan data dapat dilakukan secara akurat dan berkelanjutan.

Penelitian lain yang relevan dilakukan oleh F. Kamalov *et al.* [9], yang membahas perbandingan efektivitas tiga metode imputasi sederhana, yaitu *forward fill*, *backward fill*, dan *mean fill*, pada data deret waktu. Studi ini menggunakan data simulasi berbasis model autoregressive AR(1) untuk mengevaluasi performa masing-masing metode dalam berbagai kondisi korelasi data, dengan proporsi data hilang antara 5% hingga 30%. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kesamaan fungsi *partial autocorrelation* (PACF) antara data asli dan data hasil imputasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode mean fill memiliki performa terbaik pada data yang memiliki korelasi rendah atau karakteristik fluktuatif. Hal ini karena sifat konservatif dari mean fill mampu memberikan estimasi yang stabil ketika tren lokal tidak jelas atau terlalu acak. Di sisi lain, forward fill dan backward fill lebih efektif pada data dengan korelasi tinggi atau tren yang kuat. Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi bahwa teknik imputasi sederhana dapat memberikan hasil yang memuaskan dan layak digunakan sebagai pendekatan dasar untuk pemulihan sinyal deret waktu.

Meskipun penelitian oleh F. Kamalov *et al.* telah menunjukkan bahwa mean fill merupakan metode yang efektif dalam kondisi tertentu, pendekatan tersebut masih terbatas pada penggunaan rata-rata global dan belum mempertimbangkan variasi pola waktu secara lebih spesifik. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode imputasi sederhana berbasis waktu dengan memanfaatkan rata-rata nilai dalam kelompok waktu bertingkat, meliputi menit, jam, hari, minggu, dan bulan. Dengan ini, diharapkan metode yang digunakan dapat lebih responsif terhadap pola musiman atau temporal yang sering muncul pada data lingkungan, namun tetap mempertahankan sifat kesederhanaan algoritmik dan efisiensi komputasi sebagaimana yang dimiliki oleh metode mean fill.

Penelitian lain oleh U. A. Bhatti *et al.* [10] membahas keterkaitan antara emisi gas rumah kaca (GHG) dari sektor pertanian dengan variabel lingkungan seperti suhu, curah hujan, dan tingkat kehijauan vegetasi (*greening*). Studi ini menggunakan metode korelasi Spearman untuk mengidentifikasi hubungan non-linier antara intensitas emisi dan kondisi iklim di berbagai wilayah produksi pertanian secara global.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu merupakan faktor dominan yang secara signifikan memengaruhi peningkatan intensitas emisi GHG, sementara variabel curah hujan dan indeks kehijauan menunjukkan pola hubungan yang bervariasi tergantung pada konteks regional dan praktik produksi. Meskipun tren kehijauan meningkat, hal tersebut tidak selalu berkorelasi dengan penurunan emisi, mengindikasikan bahwa peningkatan vegetasi belum tentu disertai dengan efisiensi iklim.

Meskipun penelitian oleh U. A. Bhatti *et al.* telah menunjukkan bahwa korelasi Spearman efektif dalam mengidentifikasi hubungan antara faktor lingkungan dan emisi gas rumah kaca, namun penelitian tersebut masih terbatas pada skala spasial makro dan tidak secara spesifik mengevaluasi korelasi gas individu seperti CH₄ dan H₂O, serta belum memanfaatkan metode korelasi yang lebih sensitif terhadap pola non-linier seperti *distance correlation*.

Penelitian ini bertujuan untuk memperluas pendekatan tersebut dengan menerapkan tiga metode korelasi Spearman, Kendall Tau, dan Distance Correlation pada data

sensor *Microclimate* dan emisi di kawasan perkebunan tropis. Dengan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih detail dan akurat dalam mendeteksi keterkaitan antara parameter lingkungan dan fluktuasi emisi GHG secara lokal untuk mendukung sistem pemantauan berbasis data yang berkelanjutan.

2.2 Emisi Karbon di Lahan Gambut dan Non-Gambut

Lahan gambut merupakan ekosistem unik yang memiliki kemampuan menyimpan karbon dalam jumlah besar. Namun, Peningkatan emisi karbon dioksida (CO_2) akibat konversi lahan menjadi perkebunan kelapa sawit telah menjadi isu penting dalam pengelolaan lingkungan lahan gambut [11]. Proses dekomposisi bahan organik pada lahan gambut yang terdrainase adalah salah satu penyebab utama pelepasan karbon [12]. Selain itu, kebakaran pada lahan gambut memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi CO_2 , terutama di wilayah tropis yang rentan terhadap kebakaran lahan. Upaya mitigasi emisi karbon pada lahan gambut dapat dilakukan melalui pengelolaan lahan yang efektif, seperti penerapan teknik konservasi tanah dan air, penggunaan tanaman penutup tanah, pengapuran, serta perbaikan sistem drainase [13].

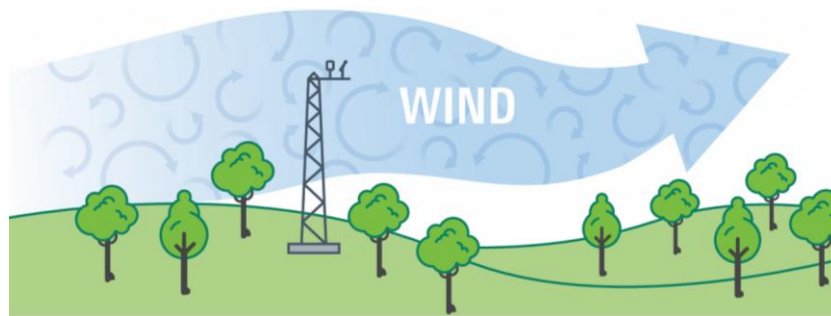
Pada lahan non-gambut, kegiatan perkebunan kelapa sawit juga menghasilkan emisi karbon meskipun intensitasnya lebih rendah dibandingkan lahan gambut [14]. Emisi karbon dari lahan non-gambut umumnya berasal dari aktivitas deforestasi, dekomposisi biomassa, penggunaan pupuk kimia, serta praktik pembakaran lahan. Meskipun emisinya lebih rendah dibandingkan lahan gambut, lahan non-gambut tetap menjadi sumber emisi karbon yang signifikan jika dikelola secara tidak berkelanjutan.

2.3 Metode *Eddy Covariance*

Metode *Eddy Covariance* merupakan teknik yang digunakan untuk mengukur pertukaran panas, massa, dan momentum antara permukaan datar, horizontal yang homogen, dan atmosfer di atasnya pertama kali diusulkan oleh Montgomery (1948), Swinbank (1951), dan Obukhov (1951) [15]. Metode ini bekerja dengan mengukur

transportasi gas oleh aliran angin tiga dimensi secara langsung dan cepat, menghasilkan perhitungan fluks turbulen dalam lapisan batas atmosfer. Metode ini sering digunakan dalam bidang mikrometeorologi untuk memahami pertukaran energi, air, dan gas dalam skala luas dari ratusan hingga jutaan meter persegi.

Metode pengukuran menggunakan *Eddy Covariance* dimulai dengan prinsip dasar yang melibatkan pengukuran pergerakan vertikal aliran udara (angin vertikal) dan konsentrasi gas secara simultan. Gas yang biasanya diukur meliputi karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), uap air (H_2O), dan gas lainnya. Fokus utama dari metode ini adalah turbulensi udara yang bertanggung jawab membawa gas naik atau turun dalam atmosfer.



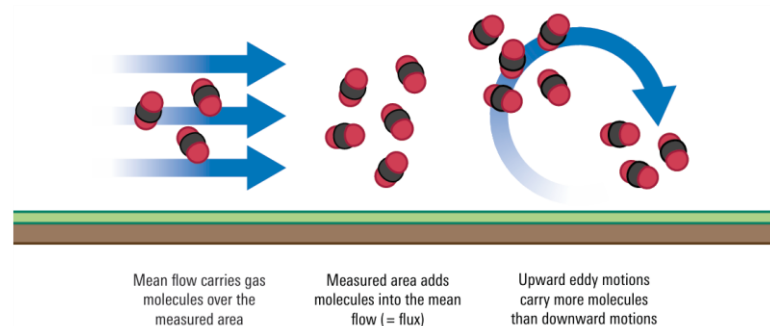
Gambar 2.1 Aliran Udara dalam Ekosistem [4]

Gambar 2.1 memperlihatkan ilustrasi aliran udara dalam suatu ekosistem. Aliran udara tersebut tidak bergerak secara linier, melainkan terdiri atas pusaran-pusaran kecil yang disebut *eddy*, yang memiliki komponen pergerakan tiga dimensi, termasuk pergerakan vertikal. Konsep ini dikenal sebagai *atmospheric eddy transport*, di mana turbulensi atmosfer berperan penting dalam memindahkan massa dan energi. Eddy terbentuk akibat kombinasi antara gesekan mekanis (*shear*) yang terjadi ketika angin horizontal terganggu oleh objek seperti vegetasi atau kontur permukaan tanah, dan gaya apung (*buoyancy*) akibat perbedaan suhu atau kelembaban udara. Energi turbulen dari eddy besar dapat berpindah ke eddy yang lebih kecil dalam proses yang disebut *turbulent energy cascade*. Pada ketinggian yang lebih tinggi dari permukaan tanah, eddy yang lebih besar dan berfrekuensi rendah mendominasi transportasi fluks, sedangkan di dekat permukaan, eddy yang lebih kecil dan berfrekuensi tinggi menjadi lebih dominan. Dalam kenyataannya,

terdapat campuran berbagai ukuran eddy yang bekerja dalam berbagai skala waktu, mulai dari orde jam hingga sepersekian detik. Pengukuran komponen turbulen ini dapat dilakukan menggunakan menara eddy covariance, sehingga memungkinkan analisis pertukaran gas rumah kaca dan energi antara ekosistem dan atmosfer.

Pengukuran dilakukan dengan instrumen khusus berakurasi tinggi. *Sonic anemometer* digunakan untuk mengukur kecepatan dan arah angin tiga dimensi dengan resolusi tinggi, di mana komponen vertikal angin sangat penting untuk menghitung fluks gas. *Gas analyzer* digunakan mendeteksi konsentrasi gas (contohnya, CO_2 dan H_2O) dalam aliran udara. Sensor tambahan, seperti termometer, barometer, dan sensor kelembapan, juga sering digunakan untuk mendukung pengukuran utama dengan memberikan informasi kondisi lingkungan sekitar.

Langkah pengukuran dimulai dengan penempatan stasiun fluks, di mana instrumen dipasang pada menara (tower) di lokasi tertentu, biasanya di atas kanopi vegetasi atau area pengamatan lainnya. Tinggi sensor disesuaikan dengan karakteristik lapangan untuk memastikan area pengukuran yang representatif (dikenal sebagai *footprint*). Selama pengumpulan data, pengukuran angin dan gas dilakukan secara waktu nyata dengan frekuensi tinggi (10-20 Hz), yang sangat penting untuk menangkap turbulensi atmosfer.



Gambar 2.2 Prinsip dasar Metode eddy covariance [4]

Gambar 2.2 menunjukkan prinsip dasar metode *eddy covariance*, yaitu bagaimana gas seperti karbon dioksida (CO_2) ditambahkan ke dalam aliran udara rata-rata (*mean flow*) dari suatu area yang diamati. Aliran udara membawa molekul gas

melewati area tersebut. Jika permukaan area tersebut melepaskan gas, maka gerakan eddy yang naik akan membawa lebih banyak molekul gas dibandingkan gerakan eddy yang turun. Perbedaan jumlah gas yang dibawa ke atas dan ke bawah inilah yang disebut sebagai fluks. Dengan mengetahui perbedaan antara gerakan turbulen ke atas dan ke bawah, kita dapat menghitung seberapa besar gas yang dilepas atau diserap oleh permukaan. Metode *eddy covariance* hanya mengukur transportasi gas akibat turbulensi, sehingga pengukuran akan akurat jika kondisi turbulen cukup berkembang, seperti pada siang hari atau malam hari dengan kecepatan angin lebih dari 1 m/s. Keunggulan metode ini adalah kemampuannya untuk mengukur fluks gas secara langsung, terus-menerus, dan dalam periode waktu yang panjang, seperti setiap 30 atau 60 menit [4].

2.4 Gas Analyzer

Gas Analyzer adalah perangkat yang dirancang untuk mengukur fluks karbon dengan memantau konsentrasi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan uap air (H_2O), antara permukaan tanah dan atmosfer [16]. Perangkat ini memiliki peran penting dalam memantau dinamika emisi karbon, khususnya di ekosistem sensitif seperti lahan gambut. Prinsip kerja perangkat ini didasarkan pada pengukuran pertukaran massa gas antara dua media, yaitu lapisan udara di atas permukaan tanah dan tanah itu sendiri.

Sensor gas yang digunakan memiliki kemampuan *high-frequency response*, sehingga dapat menangkap fluktuasi cepat dalam konsentrasi CO_2 , CH_4 , dan H_2O . Data ini sangat penting dalam metode *Eddy Covariance*, karena digunakan untuk menghitung kovarians dengan fluktuasi kecepatan angin vertikal, yang menjadi dasar perhitungan fluks karbon. Data yang dihasilkan oleh perangkat ini memberikan informasi langsung tentang perubahan konsentrasi gas di atmosfer, yang memungkinkan penghitungan fluks karbon pada skala ekosistem secara akurat. Selain itu, *Gas Analyzer* dapat dioperasikan dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk area dengan kelembapan tinggi seperti lahan gambut, menjadikannya alat yang andal untuk aplikasi di lapangan.



Gambar 2.3 *Gas Analyzer*

Pada gambar 2.3 menunjukkan implementasi perangkat *Gas Analyzer* di perkebunan kelapa sawit pada lahan gambut milik PT. Persada Dinamika Lestari.

2.5 3D Anemometer

3D Anemometer adalah perangkat yang dirancang untuk mengukur kecepatan angin dalam tiga dimensi, yaitu komponen horizontal (u') yang mewakili arah timur-barat, (v') untuk arah utara-selatan, dan (w') untuk komponen vertikal (arah atas-bawah). Anemometer secara umum adalah instrumen yang digunakan untuk mengukur arah dan kecepatan angin, yang secara teknis dapat dibagi menjadi dua kategori utama: alat untuk mengukur kecepatan angin (*velocity*) dan alat untuk mengukur tekanan angin [17]. 3D Anemometer, sebagai salah satu jenis perangkat anemometer, memiliki kemampuan mengukur kecepatan dan arah angin pada tiga sumbu spasial, yaitu horizontal, vertikal, dan lateral. Data ini sangat penting dalam metode *Eddy Covariance*, karena fluktuasi kecepatan angin vertikal (w') merupakan salah satu variabel utama dalam menghitung fluks karbon [4]. Dengan mendeteksi perubahan arah dan kecepatan angin secara *real-time* pada tiga sumbu, 3D Anemometer membantu mengidentifikasi pola turbulensi atmosfer yang menjadi dasar perhitungan aliran gas rumah kaca antara permukaan tanah dan atmosfer.



Gambar 2.4 3D Anemometer

Pada gambar 2.4 menunjukkan implementasi perangkat 3D Anemometer di perkebunan kelapa sawit pada lahan gambut milik PT. Persada Dinamika Lestari. 3D Anemometer mampu mendeteksi perubahan kecepatan angin dengan respons cepat, menjadikannya cocok untuk aplikasi di area dengan kondisi turbulensi tinggi, seperti lahan gambut. 3D Anemometer menjadi perangkat esensial dalam sistem pengukuran fluks karbon pada skala ekosistem, memastikan data yang akurat meskipun di lingkungan kompleks seperti lahan gambut.

2.6 Microclimate Station

Microclimate Station adalah perangkat yang dirancang untuk memantau parameter lingkungan secara *real-time*, meliputi suhu udara, kelembapan, tekanan atmosfer, radiasi matahari, kecepatan dan arah angin, serta curah hujan. Parameter-parameter ini berperan penting dalam mendukung analisis emisi karbon, khususnya di ekosistem yang kompleks seperti lahan gambut. Dalam metode *Eddy Covariance*, data lingkungan yang diperoleh dari *Microclimate Station* memberikan konteks yang relevan untuk memahami variabilitas fluks karbon dalam kaitannya dengan kondisi lingkungan sekitar [18]. Memahami hubungan antara parameter lingkungan dan emisi karbon memungkinkan analisis yang lebih akurat dan mendalam. Data ini juga berfungsi untuk mengidentifikasi pola musiman serta perubahan jangka panjang pada ekosistem, yang dapat memengaruhi dinamika karbon. Dengan

menyediakan informasi lingkungan yang komprehensif, *Microclimate Station* menjadi komponen penting dalam mendukung penelitian emisi karbon di lahan gambut secara berkelanjutan.



Gambar 2.5 *Microclimate Station*

Pada gambar 2.5 menunjukkan implementasi perangkat *Microclimate Station* di perkebunan kelapa sawit pada lahan gambut milik PT. Persada Dinamika Lestari.

2.7 *Microcontroller*

Penelitian ini menggunakan sebuah mikrokontroler berperforma tinggi dengan arsitektur prosesor ganda (dual-core) yang mampu menangani pemrosesan data secara paralel untuk mendukung tugas-tugas kompleks dan multitasking. Sistem ini dirancang untuk memberikan efisiensi tinggi dalam pengolahan data, sehingga sesuai digunakan pada berbagai aplikasi industri maupun penelitian. Perangkat ini dilengkapi dengan konektor berpin banyak yang memungkinkan fleksibilitas tinggi dalam penyesuaian aplikasi, seperti menghubungkan sensor, modul komunikasi, atau perangkat keras tambahan lainnya.

Mikrokontroler ini memiliki kompatibilitas luas dengan berbagai protokol komunikasi umum seperti I2C, SPI, dan UART, serta mendukung konektivitas jaringan melalui modul nirkabel dan kabel, termasuk Wi-Fi, Bluetooth, dan Ethernet. Kemampuan ini menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi Internet of

Things (IoT), pemrosesan data real-time, dan pengendalian perangkat keras secara presisi. Dengan kombinasi daya komputasi yang tinggi, skalabilitas, dan konektivitas jaringan yang andal, mikrokontroler ini menjadi pilihan tepat untuk mendukung sistem penelitian yang membutuhkan kinerja optimal.

2.8 Sensor CO₂

Sensor CO₂ yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sensor berbasis teknologi inframerah yang mampu mendeteksi dan mengukur konsentrasi karbon dioksida (CO₂) dalam rentang yang luas. Sensor ini memanfaatkan prinsip Non-Dispersive Infrared (NDIR), yang dikenal memiliki tingkat keakuratan tinggi dan selektivitas yang baik terhadap gas CO₂ tanpa bergantung pada keberadaan oksigen. Perangkat ini juga dilengkapi dengan fitur kompensasi suhu, sehingga performanya tetap stabil pada berbagai kondisi lingkungan. Sistem komunikasi yang digunakan adalah UART, sehingga sensor ini kompatibel dengan berbagai jenis mikrokontroler dan sistem tertanam lainnya.

Sensor ini memiliki daya tahan yang baik untuk penggunaan jangka panjang dan dirancang dengan teknologi deteksi penyerapan inframerah yang terintegrasi dengan sirkuit canggih untuk memastikan kinerja optimal. Beberapa keunggulannya meliputi sensitivitas tinggi, resolusi pengukuran yang baik, konsumsi daya rendah, respons cepat, serta ketahanan terhadap gangguan uap air (anti-water vapor interference). Stabilitas pengukuran yang konsisten membuatnya andal digunakan dalam berbagai kondisi lingkungan lapangan.

2.9 Sensor CH₄

Penelitian ini menggunakan sensor metana (CH₄) berbasis teknologi Non-Dispersive Infrared (NDIR), yang mampu melakukan pengukuran dengan tingkat akurasi tinggi. Teknologi NDIR dikenal memiliki selektivitas yang baik, kinerja stabil, masa pakai panjang, serta tidak memerlukan oksigen sebagai media pendukung dalam proses deteksi gas. Sensor ini dilengkapi dengan fitur kompensasi suhu melalui sensor suhu internal, sehingga kinerjanya tetap optimal meskipun terjadi perubahan suhu lingkungan. Desainnya mengintegrasikan teknologi deteksi

inframerah, teknik micro-machining, dan rangkaian sirkuit canggih, yang memberikan performa stabil serta hasil pengukuran yang presisi. Selain itu, sensor ini memiliki fleksibilitas tinggi untuk diintegrasikan dengan berbagai platform mikrokontroler dan sistem tertanam. Keunggulan tersebut menjadikannya pilihan andal untuk aplikasi pemantauan gas rumah kaca di berbagai kondisi lingkungan.

2.10 Sensor Suhu dan Kelembapan Relatif

Penelitian ini menggunakan sensor suhu dan kelembapan relatif yang dirancang untuk memberikan performa stabil, daya tahan tinggi, dan keandalan dalam berbagai kondisi lingkungan. Untuk aplikasi di luar ruangan, sensor ini dilengkapi dengan casing pelindung tahan cuaca yang berfungsi melindungi elemen sensor dari debu, kelembapan berlebih, serta paparan langsung sinar matahari. Sensor ini memanfaatkan teknologi penginderaan terintegrasi, di mana elemen sensor dan sirkuit pengolahan sinyal digabungkan dalam satu chip, sehingga memungkinkan pengukuran yang presisi dengan respons cepat. Akurasi pengukurannya mencapai $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2\%$ RH untuk kelembapan relatif. Perangkat ini mendukung komunikasi melalui protokol I2C, sehingga mudah diintegrasikan dengan berbagai platform mikrokontroler dan sistem tertanam. Dengan konsumsi daya rendah, sensor ini ideal digunakan pada sistem berbasis IoT yang membutuhkan efisiensi energi tinggi. Kombinasi antara akurasi, ketahanan, dan fleksibilitas integrasi menjadikannya andal untuk pemantauan lingkungan, termasuk di area dengan kondisi ekstrem.

2.11 Sensor Tekanan Barometrik

Penelitian ini menggunakan sensor tekanan barometrik yang dirancang untuk mengukur suhu dan tekanan udara dengan akurasi tinggi. Dibandingkan dengan generasi sebelumnya, sensor ini menawarkan beberapa peningkatan signifikan, termasuk konsumsi daya yang lebih rendah, resolusi pengukuran yang lebih tinggi, serta kecepatan pengambilan data yang lebih cepat.

Sensor ini mengintegrasikan teknologi berbasis elemen piezo-resistif yang memungkinkan pengukuran tekanan dengan presisi tinggi, efisiensi konsumsi daya, dan ketahanan terhadap gangguan elektromagnetik (EMC). Akurasi pengukuran tekanannya sekitar ± 8 Pa, yang setara dengan perbedaan ketinggian $\pm 0,5$ meter, sehingga ideal untuk aplikasi yang memerlukan deteksi perubahan ketinggian secara detail. Selain itu, sensor ini memiliki akurasi suhu absolut sebesar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dalam rentang suhu 0°C hingga 65°C , memastikan hasil pengukuran konsisten dalam berbagai kondisi lingkungan. Perangkat ini mendukung protokol komunikasi I2C dan SPI, sehingga mudah diintegrasikan dengan berbagai platform mikrokontroler dan sistem tertanam. Dengan kombinasi fitur-fitur canggih tersebut, sensor ini cocok digunakan untuk aplikasi berbasis IoT, pengukuran ketinggian, serta pemantauan lingkungan.

2.12 I2C Extender

Inter-Integrated Circuit (I2C) adalah salah satu protokol komunikasi serial yang umum digunakan pada mikrokontroler dan berbagai perangkat elektronik. Protokol ini dirancang untuk memungkinkan pertukaran data antarperangkat, seperti sensor, memori, dan periferik lainnya, hanya dengan dua jalur utama, yaitu Serial Data Line (SDA) untuk transfer data dan Serial Clock Line (SCL) untuk sinkronisasi sinyal. Keunggulan utama protokol ini adalah kemampuannya mengintegrasikan banyak perangkat dengan jumlah jalur yang minimal. Meskipun efisien, I2C memiliki keterbatasan jarak transmisi yang umumnya hanya beberapa meter. Hal ini disebabkan oleh kapasitansi kabel dan potensi gangguan elektromagnetik yang dapat menurunkan kualitas sinyal. Untuk mengatasi masalah tersebut, digunakan perangkat I2C Extender, yang berfungsi memperpanjang jangkauan komunikasi.

I2C Extender bekerja dengan mengubah karakteristik fisik sinyal I2C standar menjadi sinyal aktif dengan impedansi rendah di sisi transmisi. Mekanisme ini meningkatkan arus penggerak (drive current) dan mempercepat waktu naik/turun (slew rate), sehingga mampu mengatasi efek kapasitansi parasit dari kabel yang panjang. Di sisi penerima, sinyal dikonversi kembali ke format I2C standar agar dapat dikenali oleh perangkat I2C biasa. Transmisi dilakukan melalui dua jalur

unidirectional (terpisah untuk SDA dan SCL), yang umumnya menggunakan pasangan kabel twisted-pair seperti kabel Ethernet untuk meminimalkan interferensi elektromagnetik dan crosstalk. Selain itu, I2C Extender juga mengisolasi kapasitansi pada masing-masing sisi bus I2C, sehingga total kapasitansi yang memengaruhi performa sinyal dapat ditekan.

Dengan arsitektur ini, jarak komunikasi I2C dapat diperluas hingga puluhan meter bahkan dalam kondisi lingkungan dengan tingkat interferensi tinggi, serta mendukung kecepatan transmisi hingga 1 MHz. Keandalan dan efisiensi yang dimilikinya menjadikannya solusi efektif untuk aplikasi yang membutuhkan komunikasi I2C jarak jauh, seperti sistem Internet of Things (IoT), otomasi rumah dan industri, serta pengukuran dan pemantauan lingkungan di mana sensor-sensor ditempatkan jauh dari pengendali utama.

2.13 UART *Extender*

Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) merupakan salah satu protokol komunikasi serial yang banyak digunakan pada sistem tertanam untuk mentransmisikan dan menerima data antarperangkat secara asinkron. Perangkat keras ini berfungsi mengubah data paralel dari mikrokontroler menjadi data serial untuk dikirimkan, serta mengubah kembali data serial yang diterima menjadi data paralel untuk diproses oleh sistem. Protokol UART bekerja secara asynchronous, yang berarti tidak memerlukan sinyal clock eksternal untuk melakukan sinkronisasi antara pengirim dan penerima. Sinkronisasi dicapai melalui pengaturan kecepatan transmisi data (baud rate) yang harus sama pada kedua perangkat. Komunikasi UART umumnya menggunakan dua jalur utama, yaitu TX (transmit) untuk mengirimkan data dan RX (receive) untuk menerima data.

Keunggulan UART antara lain adalah implementasinya yang sederhana, penggunaan pin yang minimal, serta kompatibilitasnya dengan berbagai perangkat mikrokontroler dan modul komunikasi seperti Bluetooth, GPS, maupun Wi-Fi. Protokol ini juga tidak memerlukan sinyal clock tambahan, sehingga lebih efisien pada sistem yang sederhana dan hemat daya. Namun, kelemahan utamanya terletak pada jangkauan transmisi. Sinyal UART rentan terhadap gangguan elektromagnetik

(EMI) dan penurunan kualitas (signal degradation), sehingga pada umumnya hanya efektif digunakan untuk jarak 1–3 meter pada baud rate tinggi. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, digunakan UART Extender berbasis konversi RS-485 ke TTL. Perangkat ini dirancang untuk memungkinkan komunikasi serial jarak jauh menggunakan protokol RS-485, yang mengandalkan transmisi diferensial pada dua jalur data (A dan B). Sistem transmisi ini memberikan ketahanan tinggi terhadap noise dan menjaga integritas sinyal, bahkan pada kabel yang panjang dan di lingkungan dengan gangguan elektromagnetik tinggi.

UART Extender ini bekerja dengan mengonversi sinyal UART (TX/RX) dari mikrokontroler menjadi sinyal diferensial RS-485 ketika mengirim data, lalu mengubahnya kembali menjadi sinyal TTL ketika menerima data. Proses ini memanfaatkan driver dengan mekanisme push-pull pada jalur diferensial, sehingga mampu menggerakkan sinyal dengan kuat meskipun pada kabel berkapasitansi tinggi. Komunikasi yang dihasilkan umumnya bersifat half-duplex, artinya proses pengiriman dan penerimaan data dilakukan secara bergantian melalui satu jalur diferensial yang sama, sehingga hemat penggunaan kabel dan dapat mendukung topologi multi-point.

Selain memperpanjang jarak komunikasi hingga puluhan atau bahkan ratusan meter, UART Extender jenis ini biasanya memiliki konsumsi daya rendah, beroperasi pada tegangan 5V, dan kompatibel dengan protokol UART standar, sehingga mudah diintegrasikan tanpa perubahan besar pada perangkat lunak. Beberapa perangkat juga menyediakan pengendalian arah komunikasi melalui pin khusus untuk memastikan sinkronisasi yang presisi antara proses pengiriman dan penerimaan data. Dengan kemampuan memperpanjang jangkauan komunikasi UART dan mempertahankan kualitas sinyal pada kondisi lingkungan yang menantang, teknologi konversi RS-485 ke TTL menjadi solusi andal untuk berbagai aplikasi seperti sistem industri, Internet of Things (IoT), pemantauan jarak jauh, dan pengumpulan data di lapangan.

2.14 Exploratory Data Analysis (EDA)

Exploratory Data Analysis (EDA) adalah pendekatan yang digunakan untuk menganalisis dan merangkum karakteristik data melalui metode visualisasi dan statistik deskriptif. Proses ini sangat penting untuk memahami struktur dan pola data sebelum dilakukan analisis lebih lanjut, menguji hipotesis, memeriksa asumsi menggunakan ukuran statistik, serta untuk mendeteksi adanya anomali atau outlier yang dapat mempengaruhi validitas hasil penelitian [19].

Dalam penelitian ini, *Exploratory Data Analysis* (EDA) digunakan untuk memahami struktur data, perhitungan statistik deskriptif, visualisasi awal, serta untuk menganalisis missing values dan outlier pada data emisi karbon dan iklim mikro yang diukur secara simultan. Missing values merujuk pada data yang tidak tercatat atau hilang dalam suatu variabel, yang dapat terjadi karena berbagai alasan, seperti kegagalan sensor atau kesalahan dalam proses pengumpulan data. Missing values perlu diidentifikasi dan diatasi, misalnya melalui imputasi atau penghapusan data yang tidak lengkap, agar tidak mempengaruhi hasil analisis lebih lanjut. Sementara itu, outlier adalah nilai yang jauh berbeda dari data lainnya, yang dapat disebabkan oleh kesalahan pengukuran, fluktuasi ekstrem dalam kondisi lingkungan, atau faktor lain yang tidak representatif. Deteksi dan penanganan outlier penting untuk memastikan keakuratan model analisis, karena outlier yang tidak ditangani dapat mempengaruhi kesimpulan yang diambil dari data.

Melalui EDA, peneliti dapat memperoleh wawasan lebih dalam mengenai bagaimana data tersebar, mengenali pola, serta mendeteksi potensi masalah yang bisa mengganggu keandalan analisis lebih lanjut. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang distribusi data dan identifikasi masalah seperti missing values dan outlier, EDA memberikan landasan yang kuat untuk analisis data yang lebih lanjut dan pengambilan keputusan yang lebih akurat.

2.15 Preprocessing Data

Preprocessing data merupakan tahap penting dalam analisis data untuk memastikan kualitas dan integritas data yang digunakan dalam penelitian. Tahap ini meliputi

pembersihan data, penghapusan kesalahan, serta penanganan data yang hilang atau tidak konsisten. Dalam penelitian ini, preprocessing dilakukan untuk menangani missing values dan outlier, yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Untuk menangani missing values, penelitian ini menggunakan teknik imputasi. Imputasi adalah proses pengisian nilai yang hilang dengan pendekatan tertentu, dengan tujuan menggantikan data yang hilang menggunakan estimasi yang lebih akurat berdasarkan data yang ada. Untuk menangani outlier, nilai-nilai yang terdeteksi sebagai outlier digantikan dengan NaN (Not a Number), sehingga jumlah total missing values dapat dihitung dan diproses pada tahap imputasi berikutnya.

Pada penelitian ini, metode imputasi berdasarkan pola waktu (*Time-based Imputation*) diterapkan untuk mengatasi missing values pada data pengukuran emisi karbon. *Time-based Imputation* mengisi nilai yang hilang berdasarkan pola waktu tertentu, seperti menit, jam, atau hari yang relevan dengan data sebelumnya. Metode ini cocok diterapkan pada data emisi karbon yang menunjukkan fluktuasi berdasarkan waktu tertentu.

Berdasarkan penelitian sebelumnya [9], metode mean fill telah terbukti memiliki performa terbaik pada data yang memiliki korelasi rendah atau karakteristik fluktuatif. Hal ini karena sifat konservatif dari mean fill yang mampu memberikan estimasi yang stabil, terutama ketika tren lokal tidak jelas atau data terlalu acak. Namun, jika hanya menggunakan metode mean fill, hasil imputasi yang diperoleh akan cenderung menghasilkan data yang membentuk garis lurus, karena nilai yang hilang akan diisi dengan rata-rata nilai sekitar tanpa mempertimbangkan fluktuasi atau dinamika data yang lebih rumit. Ini dapat menghilangkan informasi penting yang berhubungan dengan perubahan alami dalam data, seperti fluktuasi emisi karbon yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, metode *Time-based Imputation* dikembangkan, yang mempertimbangkan perubahan pola data dari waktu ke waktu. Dengan metode ini, nilai yang hilang dapat diisi dengan cara yang lebih dinamis, mengikuti fluktuasi alami dalam data yang terobservasi sebelumnya. *Time-based Imputation* lebih efektif untuk data yang menunjukkan tren fluktuatif, seperti data emisi karbon, karena memungkinkan data yang hilang untuk diisi berdasarkan pola yang lebih

representatif dan realistis, bukan hanya angka rata-rata yang statis. Dalam penelitian ini, penerapan *Time-based Imputation* diharapkan dapat meningkatkan kualitas data yang diperoleh, dengan cara memastikan hasil imputasi tetap mencerminkan fluktuasi alami yang ada pada data pengukuran emisi karbon, sehingga hasil analisis korelasi dengan faktor lingkungan dapat lebih akurat dan lebih representatif.

Selain itu, metode interpolasi linear digunakan untuk mengisi missing values pada data iklim mikro. Interpolasi linear adalah teknik yang mengestimasi nilai yang hilang berdasarkan nilai-nilai yang tersedia di sekitarnya, dengan pendekatan garis lurus. Metode ini sangat efektif untuk mengisi data yang hilang secara kontinu dalam interval waktu yang pendek, karena hanya memerlukan dua sampel yang tersedia untuk mengimputasi setiap periode data yang hilang [20]. Dalam konteks data iklim mikro, di mana missing values relatif sedikit dibandingkan dengan data emisi karbon, penggunaan interpolasi linear dianggap sebagai metode yang tepat dan sederhana. Meskipun demikian, akurasi imputasi linear cenderung menurun seiring dengan semakin panjangnya periode data yang hilang. Oleh karena itu, interpolasi linear tetap menjadi metode yang efisien dan efektif dalam mengisi missing values pada data iklim mikro yang memiliki pola perubahan yang stabil, tanpa memberikan dampak signifikan pada fluktuasi data.

2.16 Analisis Normalitas Data

Normalitas data merujuk pada sejauh mana data yang diperoleh mengikuti distribusi normal atau distribusi Gaussian, yang merupakan distribusi probabilitas dengan bentuk lonceng simetris, di mana sebagian besar nilai data tersebar di sekitar rata-rata. Distribusi ini dikenal karena sifatnya yang simetris, dengan kemiringan (skewness) yang mendekati nol dan puncaknya yang memiliki bentuk khas, sementara ekornya relatif kecil di kedua sisi. Uji normalitas bertujuan untuk menentukan apakah data dalam penelitian ini mengikuti distribusi normal atau tidak [21]. Uji ini sangat penting karena banyak metode statistik, seperti uji korelasi parametrik, yang mengasumsikan bahwa data yang digunakan terdistribusi normal. Jika data terdistribusi normal, maka metode analisis parametrik dapat diterapkan.

Dengan mengetahui distribusi data, peneliti dapat memilih metode analisis yang tepat, seperti untuk menentukan metode korelasi yang sesuai. Namun, jika data tidak terdistribusi normal, metode analisis non-parametrik, yang tidak mengandalkan asumsi distribusi normal, lebih cocok digunakan. Metode ini dapat memberikan hasil yang lebih valid untuk data dengan distribusi yang lebih kompleks atau tidak teratur. Dalam penelitian ini, uji normalitas dilakukan menggunakan tiga metode yang berbeda, yaitu Anderson-Darling, D'Agostino, dan Shapiro-Wilk, yang masing-masing memiliki pendekatan dan karakteristik yang berbeda dalam menguji distribusi normalitas data.

2.16.1 Anderson-Darling

Anderson-Darling adalah uji statistik yang digunakan untuk menguji apakah suatu data mengikuti distribusi normal atau distribusi lainnya. Uji ini merupakan modifikasi dari uji Kolmogorov-Smirnov dan memberikan perhatian lebih besar pada distribusi ekor data [22]. Anderson-Darling sangat sensitif terhadap data yang berada di ekor distribusi, yang membuatnya lebih unggul dibandingkan dengan beberapa uji lainnya dalam mendeteksi ketidaksesuaian distribusi pada ekor data.

2.16.2 D'Agostino

D'Agostino adalah uji normalitas yang menguji adanya kemiringan (skewness) dan kurtosis dalam data. Uji ini menggabungkan dua parameter tersebut untuk menentukan apakah data berasal dari distribusi normal [21]. Uji ini sangat berguna karena menggabungkan informasi mengenai bentuk distribusi (baik ekor maupun puncak distribusi) yang tidak bisa dilihat hanya dari rata-rata atau varians semata. Uji D'Agostino cocok digunakan untuk data yang lebih besar dan dapat mendeteksi ketidaknormalan dalam bentuk distribusi.

2.16.3 Shapiro-Wilk

Shapiro-Wilk adalah uji normalitas yang paling sering digunakan karena kemampuannya untuk mendeteksi penyimpangan dari distribusi normal pada data

sampel kecil hingga sedang. Uji ini membandingkan data dengan distribusi normal teoritis dan mengukur seberapa baik data tersebut mengikuti distribusi normal [22]. Jika hasil uji menunjukkan p-value yang kecil, maka data dianggap tidak normal. Uji Shapiro-Wilk sangat efektif dalam aplikasi praktis dan sangat berguna dalam analisis data eksperimen.

2.17 Alat dan Platform Pemrosesan Data

Alat dan platform pemrosesan data merujuk pada perangkat dan lingkungan yang digunakan untuk mengolah, menganalisis, dan memvisualisasikan data. Dalam penelitian ini, alat yang digunakan adalah Python, sementara platform pemrosesan data yang digunakan adalah Google Colab dan Jupyter Notebook. Ketiganya merupakan kombinasi yang sangat populer dalam dunia analisis data karena fleksibilitas, kemudahan penggunaan, dan kemampuannya dalam menangani berbagai macam analisis data.

2.17.1 Python

Python adalah bahasa pemrograman yang digunakan secara luas untuk pemrograman ilmiah, pengolahan data, dan analisis statistik. Python memiliki berbagai pustaka atau library yang sangat berguna dalam analisis data, seperti NumPy, Pandas, Matplotlib, dan Seaborn. Library-library ini memungkinkan pengguna untuk melakukan pemrosesan data yang kompleks, analisis statistik, dan visualisasi data secara efisien. Python adalah alat utama yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengolah data emisi karbon dan faktor lingkungan lainnya.

2.17.2 Google Colab

Google Colab adalah platform berbasis cloud yang menyediakan lingkungan interaktif untuk menulis dan menjalankan kode Python. Platform ini memungkinkan pengguna untuk menjalankan kode Python tanpa perlu menginstal perangkat lunak atau pustaka tambahan di komputer lokal, serta menyediakan akses ke sumber daya komputasi seperti GPU dan TPU secara gratis, yang dapat

meningkatkan kinerja dalam pengolahan data yang lebih besar atau pemodelan yang lebih kompleks. Google Colab mendukung kolaborasi dalam penulisan dan eksekusi kode secara bersamaan, sehingga mempermudah kolaborasi antara tim peneliti.

2.17.3 Jupyter Notebook

Jupyter Notebook adalah platform berbasis web yang memungkinkan pengguna untuk membuat dan berbagi dokumen yang berisi kode yang dapat dieksekusi, teks naratif, serta visualisasi data. Dalam penelitian ini, Jupyter Notebook digunakan untuk menjalankan kode Python yang berhubungan dengan pemrosesan dan analisis data. Namun, karena keterbatasan Google Colab dalam menangani data besar dan proses komputasi yang memerlukan waktu lama, penelitian ini juga menggunakan VSCode (Visual Studio Code) sebagai editor dengan Jupyter Notebook lokal di komputer. Dengan menggunakan VSCode, proses pengolahan data dapat dilakukan lebih efisien, terutama pada dataset besar yang memerlukan waktu komputasi lama. VSCode mendukung integrasi dengan Jupyter, memungkinkan eksekusi dan manajemen notebook secara lokal dengan performa yang lebih cepat, mengatasi masalah keterlambatan yang sering terjadi pada Google Colab ketika menangani data besar.

2.18 Korelasi Spearman

Korelasi Spearman adalah metode statistik non-parametrik yang digunakan untuk mengukur hubungan antara dua variabel ordinal atau interval yang tidak mengikuti distribusi normal. Sumber data yang digunakan dalam analisis korelasi ini tidak harus identik, dan variabel tidak harus berdistribusi normal serta dapat berasal dari data ordinal. Simbol yang biasa digunakan untuk korelasi rank Spearman adalah r_s atau ρ . Korelasi Spearman menghasilkan koefisien korelasi Spearman (ρ) yang berkisar antara -1 hingga 1. Nilai ρ yang positif menunjukkan adanya hubungan positif atau searah antara kedua variabel, sedangkan nilai ρ yang negatif menunjukkan hubungan negatif atau berlawanan arah. Jika nilai ρ mendekati 0, maka tidak terdapat hubungan yang kuat antara kedua variabel.

Untuk menghitung korelasi spearman, rumus yang digunakan adalah [23]:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D^2}{n(n^2-1)} \quad (2.2)$$

Dimana:

r_s (rho) = Korelasi spearman

D = Selisih antara rank X dan Y

6 = Angka ketetapan/ konstan persamaan

n = jumlah pasangan data.

Untuk memahami interpretasi koefisien korelasi dapat merujuk pada tabel 2.7

Tabel 2.1 Klasifikasi koefisien korelasi

No.	Interpretasi Korelasi	Nilai Rentan Korelasi
1	Negatif sempurna	-1
2	Negatif sangat kuat	$-1 < r < -0,9$
3	Negatif kuat	$-0,9 < r < -0,5$
4	Negatif lemah	$-0,5 < r < 0$
5	Tidak berkorelasi	0
6	Positif lemah	$0 < r < 0,5$
7	Positif kuat	$0,5 < r < 0,9$
8	Positif sangat kuat	$0,9 < r < 1$
9	Positif sempurna	1

Tabel 2.7 klasifikasi ini digunakan untuk menginterpretasikan kekuatan hubungan antara dua variabel berdasarkan nilai koefisien korelasi. korelasi Spearman sering digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara variabel-variabel yang tidak terdistribusi normal. Misalnya, dalam studi mengenai pengaruh parameter meteorologi terhadap konsentrasi CO₂ dan CH₄, korelasi Spearman dapat membantu mengidentifikasi pola hubungan yang tidak linier namun konsisten antara variabel-variabel tersebut. Dengan demikian, korelasi Spearman merupakan alat yang sangat berguna dalam analisis data lingkungan, terutama ketika data yang tersedia bersifat ordinal atau tidak memenuhi asumsi distribusi normal,

memungkinkan peneliti untuk mengungkap hubungan yang mungkin tidak terdeteksi dengan metode statistik lainnya.

2.19 Korelasi Kendall Tau

Korelasi Kendall Tau adalah teknik non-parametrik yang mengukur kekuatan dan arah hubungan antara dua variabel ordinal atau kuantitatif berdasarkan peringkat. Korelasi Kendall Tau (τ) memberikan nilai antara -1 dan 1, dengan nilai yang lebih tinggi menunjukkan hubungan yang lebih kuat dan lebih konsisten. Korelasi Kendall Tau digunakan untuk menganalisis data yang mungkin tidak memiliki hubungan linear tetapi memiliki hubungan yang dapat diurutkan.

Kendall (1938) mendefinisikan ukuran korelasi berikut [24]:

$$\tau = \frac{2 \Sigma}{n(n-1)} \quad (2.3)$$

Dimana:

Σ = selisih antara nilai konkordansi dan diskordansi

n = jumlah pasangan X dan Y

2.20 Korelasi Distance

Korelasi Distance adalah ukuran statistik non-parametrik yang digunakan untuk mengukur ketergantungan antara dua vektor acak, baik yang berdimensi sama maupun berbeda. Berbeda dengan koefisien korelasi Pearson yang hanya mengukur hubungan linier, korelasi distance dapat mendeteksi baik hubungan linier maupun non-linier antara dua variabel atau vektor acak. Kelebihan utama dari korelasi distance adalah bahwa nilai korelasinya hanya nol jika dan hanya jika kedua variabel tersebut independen secara statistik. Hal ini menjadikannya lebih sensitif dalam mendeteksi ketergantungan dibandingkan dengan metode korelasi tradisional lainnya.

Koefisien korelasi distance ($R(X,Y)$) didefinisikan sebagai berikut [25]:

$$R^2(X, Y) = \frac{V^2(X,Y)}{\sqrt{V^2(X,X).V^2(Y,Y)}} \quad (2.4)$$

Di mana:

$V^2(X, Y)$ adalah kovarians jarak antara dua vector acak X dan Y

$V^2(X, X)$ dan $V^2(Y, Y)$ adalah varians jarak dari masing-masing vector acak

Kovarians jarak dihitung dengan terlebih dahulu menentukan matriks jarak Euclidean antara pasangan elemen dalam masing-masing vektor, kemudian melakukan sentralisasi ganda (double centering) pada matriks tersebut. Hasil akhirnya adalah ukuran ketergantungan yang tidak hanya sensitif terhadap hubungan linier tetapi juga terhadap hubungan non-linier.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama enam bulan, mencakup seluruh tahapan yang meliputi studi literatur, pengembangan perangkat, pengujian awal perangkat, implementasi di lapangan, akuisisi dan analisis data, evaluasi dan interpretasi hasil, hingga penyusunan laporan.

3.2 Deskripsi Lokasi dan Kriteria Pemilihan

Penelitian ini dilakukan di dua lokasi utama yang dipilih berdasarkan kriteria tertentu untuk mendukung pengembangan, pengujian, dan implementasi perangkat. Lokasi-lokasi tersebut adalah Laboratorium Telekomunikasi Universitas Lampung dan perkebunan PT. Persada Dinamika Lestari *Plantation* di Kalimantan Selatan.

3.2.1 Laboratorium Telekomunikasi Universitas Lampung

Laboratorium Telekomunikasi Universitas Lampung dipilih sebagai lokasi utama untuk pengembangan perangkat penelitian ini karena fasilitasnya yang mendukung pengujian dan pengembangan teknologi berbasis komunikasi data. Laboratorium ini memiliki perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan untuk merancang, menguji, dan memvalidasi sistem elektronik serta komunikasi data, seperti mikrokontroler, sensor, modul komunikasi, dan server data. Lokasi laboratorium yang mudah diakses oleh peneliti memungkinkan pengawasan dan pengelolaan proses pengembangan secara efisien. Laboratorium ini menjadi tempat untuk merancang, mengembangkan, menguji, dan memvalidasi perangkat *Gas*

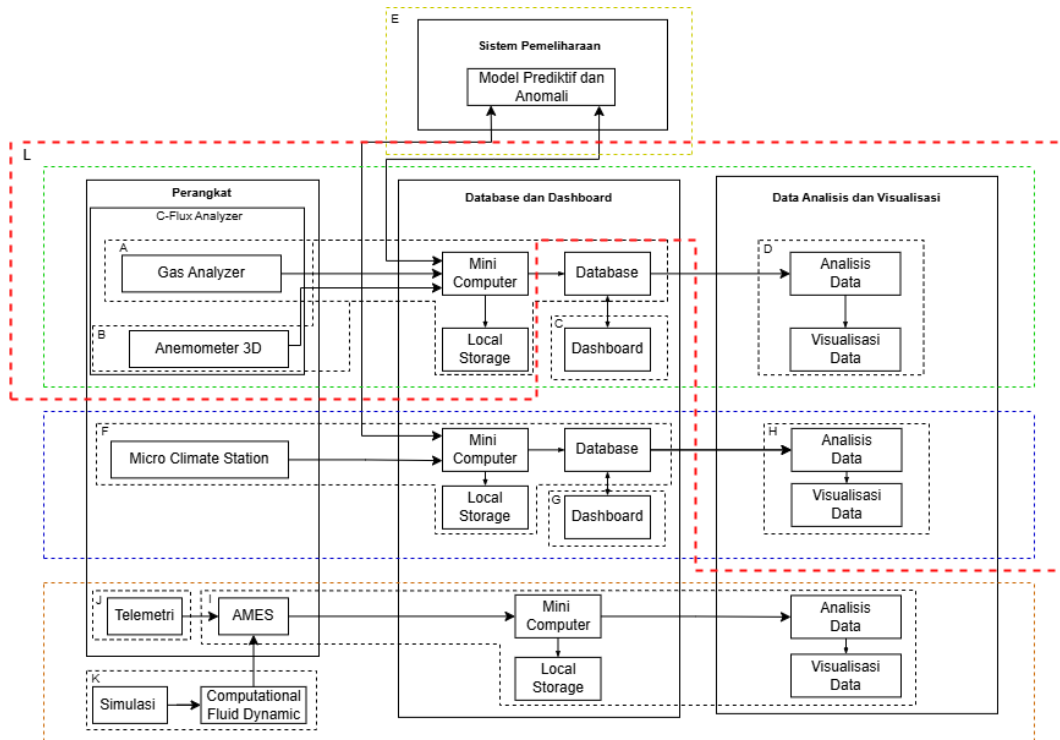
Analyzer, 3D Anemometer, dan *Microclimate Station* sebelum perangkat tersebut diimplementasikan di lapangan. Dengan fasilitas dan aksesibilitas yang dimiliki, laboratorium ini menjadi tempat yang ideal untuk memastikan perangkat berfungsi optimal sebelum digunakan untuk pengumpulan data di lokasi penelitian.

3.2.2 PT. Persada Dinamika Lestari *Plantation*

PT. Persada Dinamika Lestari *Plantation* adalah perkebunan kelapa sawit yang terletak di Kecamatan Banjar, Kabupaten Hulu Sungai Utara, Kalimantan Selatan, dengan luas area yang mencakup lahan gambut tropis. Lokasi ini memiliki karakteristik lingkungan yang sesuai untuk penelitian emisi karbon, seperti keberadaan lahan gambut dengan vegetasi khas perkebunan kelapa sawit, serta aktivitas agrikultur intensif. Keberadaan lahan gambut di lokasi ini memberikan kesempatan untuk mempelajari dinamika emisi gas rumah kaca akibat aktivitas agrikultur intensif. Selain itu, perkebunan ini memberikan akses penuh kepada peneliti untuk melakukan instalasi perangkat, pengumpulan data lapangan, dan pengujian perangkat dalam kondisi lingkungan nyata. Dukungan operasional dari pihak perkebunan, seperti logistik dan pemeliharaan perangkat, juga menjadi faktor penting dalam pemilihan lokasi ini. Implementasi perangkat di lokasi ini bertujuan untuk memastikan keandalan perangkat dalam mengukur parameter lingkungan secara *real-time* serta untuk menganalisis hubungan antara emisi karbon dan faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhinya.

3.3 *Capstone Project*

Penelitian ini merupakan bagian dari *Capstone Project* yang dilakukan oleh Tim *Eddy Covariance Station* (ECS), yang bertujuan untuk mengintegrasikan berbagai komponen sistem dalam pengukuran fluks karbon secara *real-time*. *Capstone project* pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram *Capstone Project Eddy Covariance Station (ECS)*

Berdasarkan Gambar 3.1, proyek ini mencakup berbagai sub-proyek yang saling terhubung dan dikerjakan oleh anggota tim. Proyek *Gas Analyzer* (Bagian A) dikerjakan oleh Wisnu, dengan fokus pada pengembangan perangkat *Gas Analyzer* melalui perancangan *board PCB* dan pemrosesan data di mikrokomputer. Proyek *Anemometer 3D* (Bagian B), yang berfungsi untuk mengukur kecepatan angin dalam tiga dimensi, dikerjakan oleh Rizky, sementara *Dashboard* (Bagian C) untuk visualisasi data *real-time* dikerjakan oleh Dwi Aji. Pemadanan data perangkat ECS dengan perangkat referensi Li-Cor (Bagian D) dilakukan oleh Sofya. Sistem pemeliharaan berbasis model prediktif dan deteksi anomali (Bagian E) dikembangkan oleh Afni.

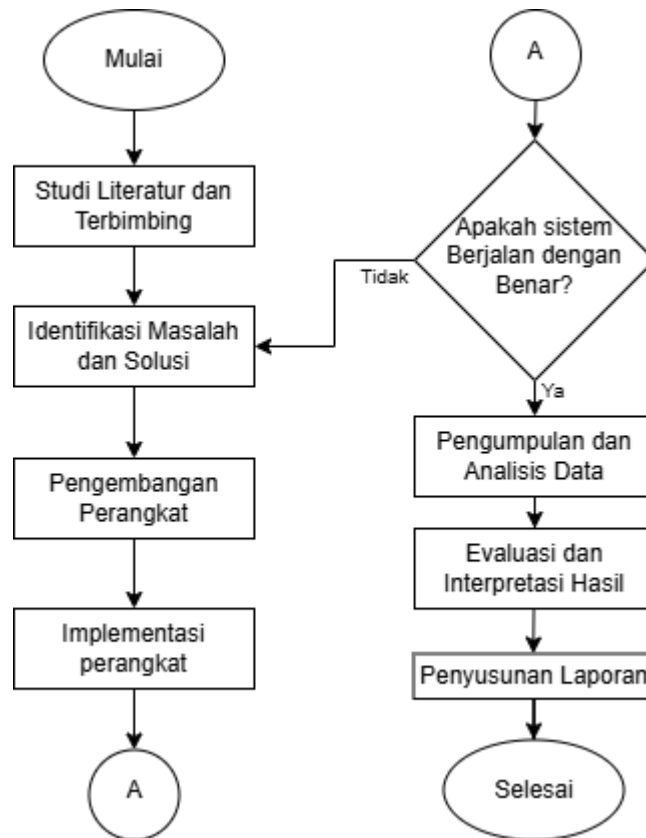
Selain itu, *Microclimate Station* (Bagian F), yang merekam parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, tekanan udara, dan curah hujan, dikerjakan oleh Akmal, dengan dukungan *Dashboard Microclimate Station* (Bagian G) yang dirancang oleh Witra dan Dany. Pengolahan dan analisis data *Microclimate Station* (Bagian H) dikerjakan oleh Siti untuk mendeteksi anomali dari data *Microclimate*. Proyek *Aerial Measurement Eddy Covariance System (AMES)* (Bagian I), yang bertujuan untuk mengukur fluks karbon menggunakan *drone*, dikerjakan oleh Dwika,

sementara sistem telemetri (Bagian J) untuk memastikan transmisi data yang stabil dikembangkan oleh Rhamadani. Simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD) (Bagian K), yang bertujuan untuk memodelkan pola turbulensi atmosfer bagi *drone* AMES, dikerjakan oleh Dwipa.

Penelitian ini secara khusus berfokus pada pemahaman korelasi antara data emisi karbon dan faktor-faktor lingkungan, sehingga memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap hubungan antara emisi gas rumah kaca dan parameter lingkungan. Selain itu, penelitian ini juga mencakup aspek pengembangan teknis, seperti perluasan komunikasi I2C dan UART pada sensor, sebagai bagian dari penyempurnaan perangkat Gas Analyzer (bagian L). Diagram pada Gambar 3.1 mengilustrasikan keterkaitan antara berbagai sub-proyek dalam sistem ECS yang kompleks dan terintegrasi, menunjukkan peran setiap anggota tim dalam mencapai tujuan penelitian secara holistik.

3.4 Kerangka Kerja Penelitian

Dalam penelitian ini, proses dilaksanakan melalui tahapan-tahapan yang dirancang secara sistematis untuk memastikan setiap fase berkontribusi pada pencapaian tujuan penelitian. Setiap langkah memiliki peran penting dalam mengarahkan penelitian dari tahap awal konsepsi hingga penyusunan kesimpulan. Pendekatan bertahap ini tidak hanya meningkatkan akurasi dan keandalan dalam pengumpulan serta analisis data, tetapi juga memungkinkan pemanfaatan sumber daya dan waktu secara efisien. Dengan adanya evaluasi berkala di setiap fase, peneliti dapat memastikan bahwa penelitian tetap berada pada jalur yang sesuai dengan tujuan yang telah dirumuskan. Gambar 3.2 menunjukkan diagram alir kerangka kerja penelitian yang menjadi panduan utama dalam pelaksanaan penelitian ini.



Gambar 3.2 Diagram Alir Kerangka Kerja Penelitian

Kerangka kerja penelitian ini dirancang untuk memberikan alur sistematis dalam mencapai tujuan utama, yaitu implementasi perangkat dan analisis data Gas Analyzer untuk pemantauan emisi karbon di perkebunan kelapa sawit lahan gambut. Penelitian diawali dengan tahap studi literatur dan terbimbing, di mana berbagai penelitian terdahulu yang relevan dikaji untuk memahami metode *Eddy Covariance*, teknologi perangkat pengukuran emisi karbon, dan pengolahan data. Tahap ini juga melibatkan diskusi dengan pembimbing untuk memastikan arah penelitian sesuai dengan tujuan. Selanjutnya, dilakukan identifikasi masalah dan solusi, di mana tantangan utama terkait pengukuran emisi karbon di lahan gambut diidentifikasi, dan solusi berupa perangkat serta metode pengukuran yang sesuai dirumuskan.

Berdasarkan hasil identifikasi masalah, penelitian berlanjut ke tahap pengembangan perangkat, yang melibatkan perancangan dan penyempurnaan perangkat seperti *Gas Analyzer*, 3D Anemometer, dan *Microclimate Station*. Fokus pengembangan adalah meningkatkan efisiensi, akurasi, dan keandalan perangkat

dalam pengukuran emisi karbon serta parameter lingkungan lainnya. Setelah perangkat selesai dikembangkan, dilakukan implementasi perangkat di lokasi penelitian, yaitu di perkebunan kelapa sawit PT. Persada Dinamika Lestari, Kalimantan Selatan. Pada tahap ini, perangkat diinstal dan diuji untuk memastikan semua fungsi berjalan sesuai spesifikasi.

Setelah implementasi, dilakukan pengujian untuk menentukan apakah sistem berjalan dengan benar. Jika sistem tidak berfungsi sebagaimana mestinya, evaluasi dilakukan untuk memperbaiki masalah sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya. Jika sistem berfungsi dengan baik, penelitian dilanjutkan ke tahap pengumpulan dan analisis data. Data lapangan, seperti konsentrasi gas rumah kaca (CO_2 , CH_4), kecepatan angin, suhu, kelembapan, dan tekanan udara, dikumpulkan menggunakan perangkat yang telah diimplementasikan. Data ini kemudian dianalisis untuk mengevaluasi korelasi antara data emisi yang diperoleh dari Gas Analyzer dan faktor lingkungan yang diukur oleh Microclimate Station.

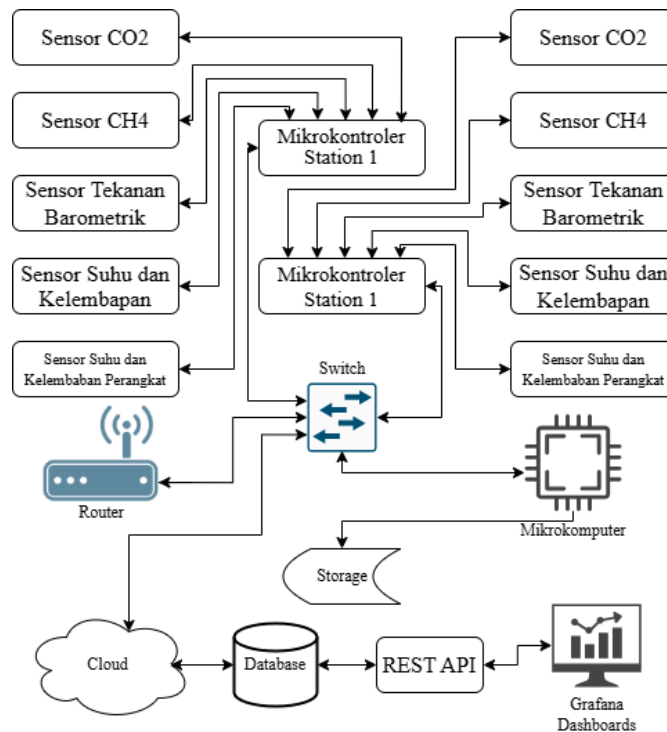
Tahap selanjutnya adalah evaluasi dan interpretasi hasil, di mana data yang telah dianalisis dievaluasi untuk memastikan keandalan perangkat serta metode yang digunakan. Interpretasi hasil dilakukan untuk memahami pola emisi karbon, faktor-faktor yang memengaruhinya, dan implikasi lingkungan. Akhirnya, hasil penelitian disusun dalam laporan pada tahap penyusunan laporan penelitian, yang mencakup deskripsi perangkat, metode, hasil analisis, dan rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut. Kerangka kerja ini memastikan penelitian berjalan secara terstruktur dan menghasilkan temuan yang valid serta bermanfaat.

3.5 Pengembangan Perangkat

Pengembangan perangkat dalam penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kemampuan perangkat dalam mengukur emisi karbon serta parameter lingkungan. Perangkat yang dikembangkan mencakup *Gas Analyzer*, 3D Anemometer, dan *Microclimate Station*. Berikut adalah deskripsi pengembangan masing-masing perangkat.

3.5.1 Gas Analyzer

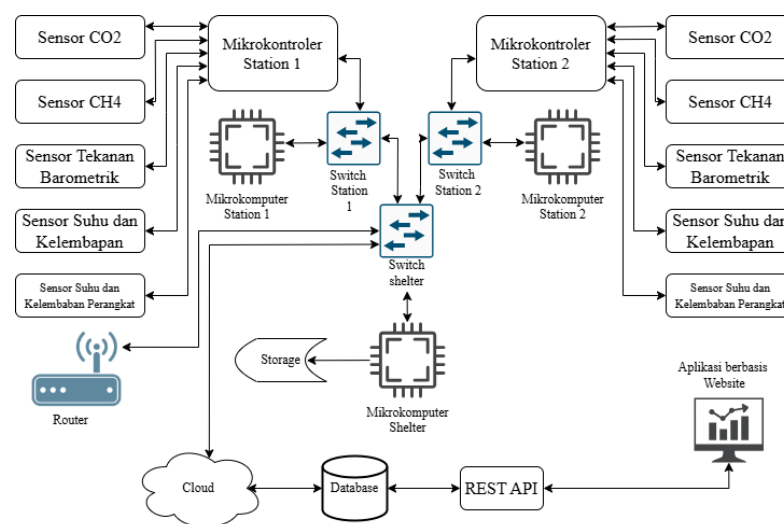
Gambar 3.3 merupakan diagram blok Gas Analyzer versi 1. Gas Analyzer merupakan perangkat utama dalam penelitian ini yang dirancang untuk mengukur emisi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4), serta parameter lingkungan, termasuk tekanan barometrik, suhu, dan kelembapan.



Gambar 3.3 Diagram Blok Gas Analyzer Versi 1

Berdasarkan konfigurasi *Gas Analyzer* versi 1, perangkat ini terdiri dari berbagai komponen utama yang terintegrasi untuk memastikan pengumpulan data dilakukan secara efisien. Komponen inti dari *Gas Analyzer* adalah mikrokontroler, yang bertindak sebagai pengontrol utama untuk menerima data dari berbagai sensor. Setiap stasiun *Gas Analyzer* dilengkapi dengan sensor untuk mengukur konsentrasi CO_2 , konsentrasi CH_4 , tekanan udara, suhu dan kelembapan, serta sensor tambahan untuk memantau suhu dan kelembapan di dalam *mainboard case*. Kedua stasiun *Gas Analyzer*, yaitu *Gas Station 1* dan *Gas Station 2*, terhubung ke switch melalui jaringan kabel untuk mengirimkan data menggunakan komunikasi TCP/IP ke mikrokomputer. mikrokomputer berfungsi sebagai pusat penyimpanan data, di

mana data yang diterima hanya disimpan di database lokal tanpa dilakukan pengolahan lebih lanjut pada versi ini. Komunikasi antar perangkat difasilitasi oleh router, yang menghubungkan perangkat keras lokal dengan sistem *cloud* untuk pengarsipan dan pemantauan jarak jauh. Data yang tersimpan di database lokal dapat diakses melalui REST API untuk divisualisasikan secara *real-time* menggunakan Grafana *Dashboards*. Dengan konfigurasi ini, *Gas Analyzer* versi 1 berfungsi sebagai sistem pengumpulan data yang akurat dan andal untuk mendukung penelitian dalam mengukur emisi karbon di lapangan.

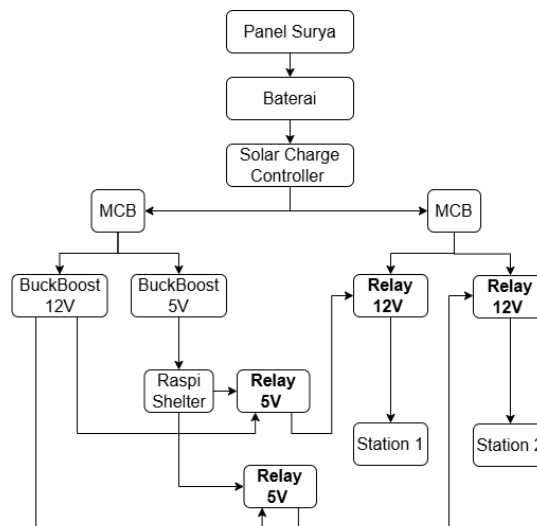


Gambar 3.4 Diagram Blok *Gas Analyzer* Versi 2

Pada gambar 3.4 menunjukkan diagram blok *Gas Analyzer* versi 2 yang merupakan hasil pengembangan dari versi sebelumnya yang difokuskan pada peningkatan integrasi perangkat, stabilitas sistem, dan efisiensi dalam pengumpulan data. Salah satu inovasi utama pada versi ini adalah penambahan mikrokomputer di setiap stasiun, yang berfungsi untuk mengintegrasikan data dari *Gas Analyzer* dengan perangkat 3D Anemometer. Mikrokomputer di setiap stasiun memungkinkan pengelolaan data secara lokal sebelum data diteruskan ke mikrokomputer di *shelter*. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi beban pemrosesan pada pusat pengolahan di *shelter* tetapi juga meningkatkan fleksibilitas dalam distribusi tugas pengolahan data. Selain itu, terdapat pembaruan signifikan pada jenis sensor suhu dan kelembapan yang digunakan. Pada versi ini, sensor yang sebelumnya digunakan digantikan dengan sensor baru yang lebih tahan terhadap kondisi lingkungan luar

ruangan. Sensor baru ini memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap fluktuasi suhu dan kelembapan yang tinggi, menghasilkan data yang lebih akurat dan andal dalam pengukuran parameter lingkungan.

Pengembangan lainnya mencakup optimalisasi jaringan dengan penambahan switch lokal di setiap stasiun untuk menghubungkan perangkat menggunakan protokol TCP/IP. Data yang dikumpulkan dari masing-masing stasiun kemudian diteruskan ke mikrokomputer di *shelter*, yang bertindak sebagai pusat penggabungan dan penyimpanan data. Data yang telah terkumpul di *shelter* juga diteruskan ke sistem *cloud* untuk pemantauan jarak jauh, dan dapat diakses melalui REST API untuk divisualisasikan secara *real-time* menggunakan aplikasi berbasis web. Pengembangan ini memberikan solusi yang lebih terstruktur untuk integrasi perangkat, meningkatkan stabilitas sistem komunikasi, dan memastikan bahwa data yang dikumpulkan relevan dan akurat, sehingga mendukung kebutuhan penelitian emisi karbon di lapangan secara lebih efektif.

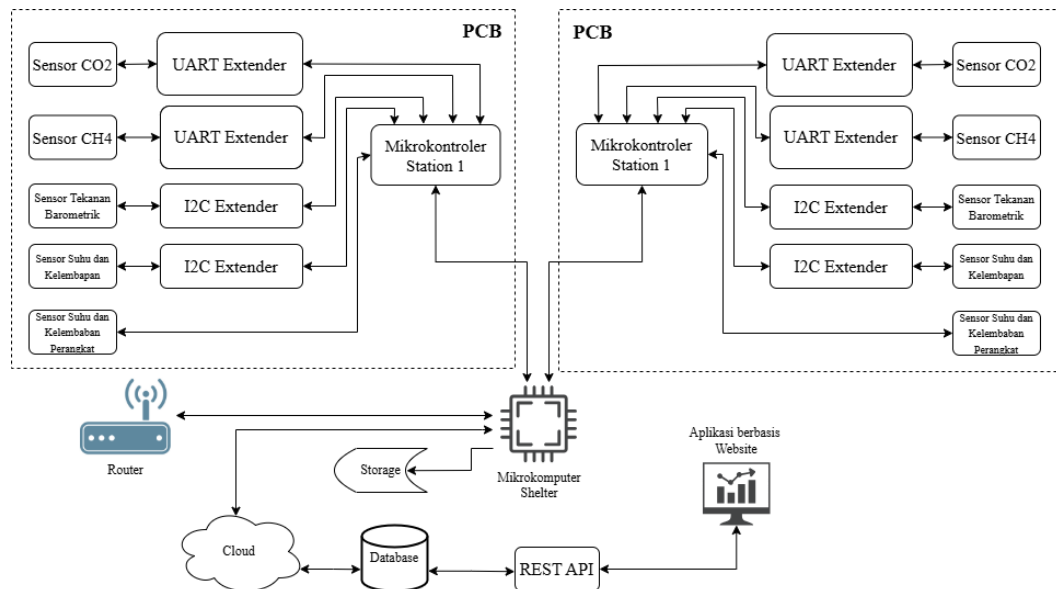


Gambar 3.5 Diagram Blok Gas Analyzer Versi 2 bagian Daya

Gambar 3.5 merupakan diagram blok *Gas Analyzer* versi 2 pada bagian daya. Sistem daya dikembangkan dengan penambahan fitur pengendalian melalui relay untuk meningkatkan keandalan perangkat di lapangan. Perubahan ini dilakukan untuk mengatasi permasalahan yang sering terjadi pada versi sebelumnya, seperti sensor yang berhenti bekerja atau perangkat di stasiun yang mati mendadak.

Penambahan relay memungkinkan proses *restart* otomatis pada Stasiun 1 dan Stasiun 2, sehingga perangkat dapat kembali berfungsi normal tanpa memerlukan intervensi manual langsung di lokasi. Sistem daya tetap menggunakan panel surya sebagai sumber energi utama, yang mengisi daya ke baterai melalui *solar charge controller*. *Solar charge controller* berfungsi untuk mengelola pengisian daya secara efisien dan mencegah *overcharge* atau pengosongan daya yang berlebihan. Dari baterai, daya didistribusikan melalui MCB (*Miniature Circuit Breaker*) untuk melindungi perangkat dari arus lebih sebelum diteruskan ke *shelter* dan stasiun.

Perubahan signifikan pada sistem ini adalah penambahan relay pada jalur distribusi daya ke *shelter* dan stasiun. Relay 5V di *shelter* berfungsi untuk mentrigger relay 12V, yang bertugas mengelola distribusi daya ke Stasiun 1 dan Stasiun 2. Relay 5V dikendalikan oleh mikrokomputer di *shelter* melalui antarmuka Node-RED, sehingga memungkinkan kontrol jarak jauh terhadap daya yang dialirkan ke setiap stasiun. Dengan kombinasi relay ini, mikrokomputer di *shelter* dapat memutuskan dan menyambung kembali daya ke stasiun sesuai kebutuhan, seperti ketika terdeteksi gangguan pada sensor atau perangkat di stasiun. Hal ini memungkinkan perangkat di stasiun untuk *restart* secara otomatis, sehingga dapat kembali beroperasi normal tanpa memerlukan intervensi manual. Penambahan sistem relay yang dapat dikendalikan melalui Node-RED memberikan fleksibilitas tinggi dalam pengelolaan daya, sekaligus memastikan perangkat tetap andal dan berfungsi optimal di lapangan. Dengan sistem ini, masalah teknis yang sering terjadi dapat ditangani secara cepat dan efisien, mendukung keberlanjutan operasional perangkat *Gas Analyzer*.



Gambar 3.6 Diagram Blok Gas Analyzer Versi 3

Seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.6, diagram blok *Gas Analyzer* versi 3 menunjukkan pengembangan lanjutan yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi integrasi perangkat keras, stabilitas komunikasi, serta kualitas pengolahan data di lapangan. Perubahan signifikan pada versi ini meliputi penggunaan PCB custom, penambahan *I2C Extender*, dan *UART Extender* untuk mendukung komunikasi jarak jauh antar sensor, serta penerapan *pre-processing* data langsung di mikrokomputer *shelter*. Setiap stasiun *Gas Analyzer* (*Gas Station 1* dan *Gas Station 2*) kini dilengkapi dengan *UART Extender* yang memungkinkan komunikasi serial antar sensor dengan stabilitas tinggi dan jangkauan yang lebih jauh. Hal ini sangat penting untuk sensor seperti CO₂ dan CH₄, yang sebelumnya memiliki keterbatasan dalam jangkauan komunikasi. Selain itu, penggunaan *I2C Extender* diterapkan untuk sensor tekanan barometrik serta sensor suhu dan kelembapan, sehingga memungkinkan pemasangan sensor pada jarak yang lebih jauh dari unit kontrol tanpa mengurangi kecepatan atau akurasi pengambilan data.

Pada versi ini, PCB custom dirancang untuk menggantikan kebutuhan *breakout board* standar mikrokontroler, yang memungkinkan integrasi seluruh komponen dalam satu platform yang lebih kompak dan efisien. Dengan adanya PCB custom, sistem menjadi lebih efisien, mudah dipasang, serta lebih ekonomis dibandingkan dengan konfigurasi sebelumnya yang menggunakan beberapa modul terpisah. Peningkatan lainnya adalah penerapan *pre-processing* data menggunakan Python di

mikrokomputer *shelter*. Proses *pre-processing* mencakup sampling data, deteksi anomali seperti data duplikat, *missing value*, dan *outlier*. Dengan langkah ini, data yang diterima dari stasiun diproses terlebih dahulu untuk memastikan kualitas sebelum dikirimkan ke server atau database. Proses ini dikontrol menggunakan Node-RED, yang memungkinkan integrasi yang mudah dengan sistem pengolahan data lainnya. Dengan adanya *pre-processing*, data yang dikirimkan ke *cloud* atau database menjadi lebih bersih dan siap untuk dianalisis lebih lanjut, sehingga meningkatkan efisiensi proses analisis dan interpretasi.

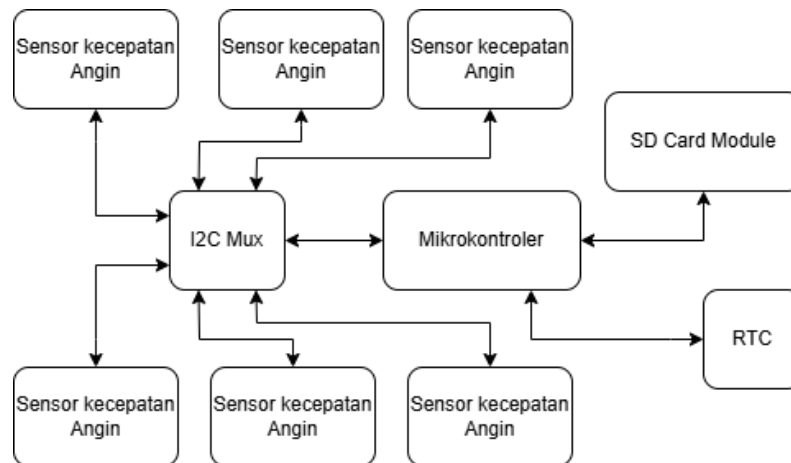
Gas Analyzer versi 3 menghadirkan sistem yang lebih terintegrasi, efisien, dan handal untuk mendukung penelitian di lapangan. Dengan PCB custom, sistem komunikasi yang ditingkatkan, serta *pre-processing* data, perangkat ini tidak hanya menghasilkan data yang lebih akurat tetapi juga siap untuk dianalisis dengan lebih efisien. Penggunaan *I2C Extender* dan *UART Extender* memastikan stabilitas komunikasi antar sensor, sementara integrasi dengan Node-RED dan Python mempermudah pengelolaan data.

3.5.2 3D Anemometer

Seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.8 3D Anemometer versi 1 dirancang untuk mengukur kecepatan dan arah angin dalam tiga dimensi menggunakan enam *Digital Airspeed Sensor* yang diposisikan secara geometris untuk membentuk sumbu kartesian (x, y, z).

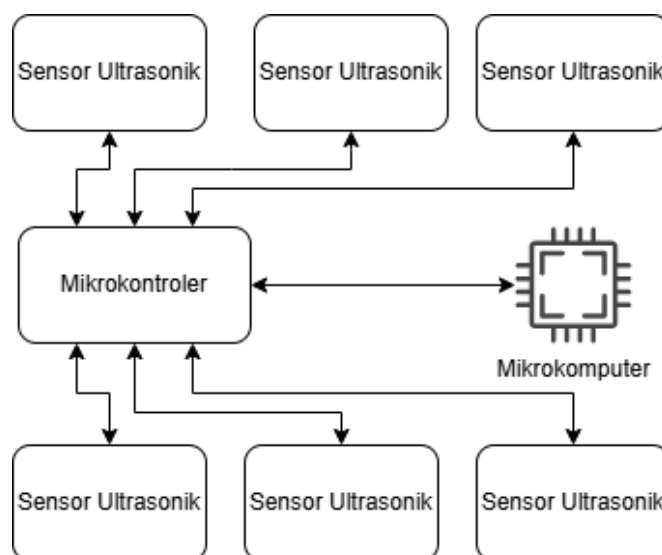
Keenam sensor ini dihubungkan melalui *I2C Multiplexer (I2C Mux)*, yang memungkinkan pengelolaan data dari beberapa sensor dengan alamat *I2C* serupa. Multiplexer ini terhubung ke mikrokontroler, yang berfungsi sebagai mikrokontroler utama untuk menerima data, mengolahnya, dan menyimpan hasil pengukuran. Data kecepatan angin yang diterima dari masing-masing sensor diproses secara *real-time* oleh mikrokontroler dengan bantuan *RTC (Real-time Clock)* untuk memberikan cap waktu (*timestamp*) pada setiap pengukuran, sehingga data yang dihasilkan dapat disinkronkan secara akurat dengan waktu pengambilan. Selain itu, hasil pengolahan data disimpan secara lokal menggunakan *SD Card*

Module, memungkinkan pengarsipan data secara *offline* untuk mendukung analisis lebih lanjut.



Gambar 3.7 Diagram Blok 3D Anemometer Versi 1

Dengan arsitektur ini, 3D Anemometer versi 1 mampu mengukur kecepatan dan arah angin secara presisi sekaligus memastikan data dapat diarsipkan dengan baik. Sistem ini menawarkan solusi sederhana namun efisien untuk pengukuran angin tiga dimensi, memanfaatkan kemampuan I2C Multiplexer untuk mengintegrasikan banyak sensor tanpa konflik alamat. Penggunaan RTC dan *SD Card Module* juga memastikan data yang dihasilkan tidak hanya akurat tetapi juga tersimpan dengan baik untuk kebutuhan penelitian jangka panjang.



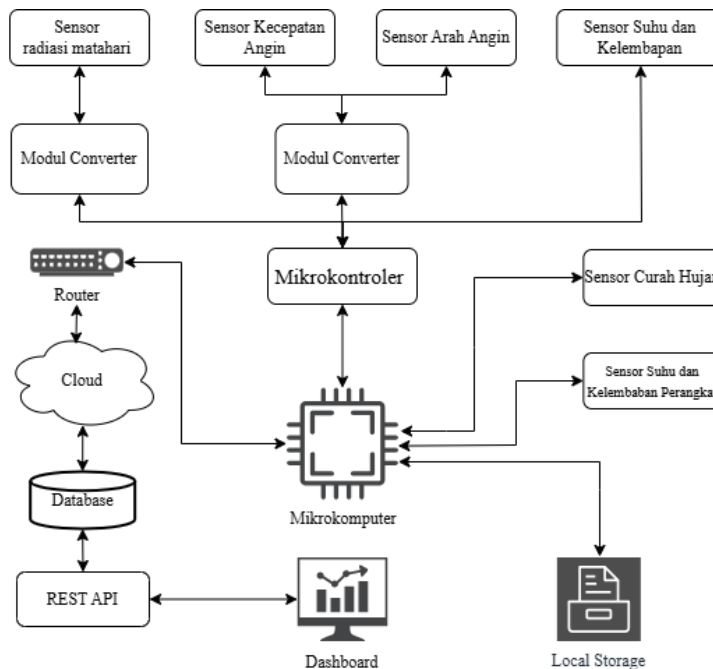
Gambar 3.8 Diagram Blok 3D Anemometer Versi 2

Gambar 3.9 menunjukkan 3D Anemometer versi 2 yang merupakan pengembangan dari versi sebelumnya yang dirancang untuk meningkatkan akurasi pengukuran, stabilitas komunikasi, dan efisiensi pengolahan data. Pada versi ini, perangkat menggunakan enam sensor ultrasonic, yaitu sensor yang dirancang untuk mendeteksi kecepatan dan arah angin secara presisi. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk mengukur perubahan waktu tempuh gelombang akibat pergerakan udara, menggantikan sensor kecepatan angin pada versi sebelumnya. Penggunaan sensor ultrasonik memberikan keunggulan berupa akurasi tinggi dan kemampuan bekerja di berbagai kondisi lingkungan, termasuk area dengan tingkat polusi debu atau kelembapan tinggi. Setiap sensor ultrasonik dihubungkan langsung ke mikrokontroler sebagai pengontrol utama, yang bertugas mengumpulkan data dari keenam sensor, memprosesnya secara *real-time*, dan menambahkan cap waktu pada data hasil pengukuran. Data yang telah diproses oleh mikrokontroler kemudian diteruskan ke mikrokomputer, yang berfungsi sebagai pusat pengelolaan data sementara. Mikrokomputer menggabungkan data dari mikrokontroler dan menyimpannya secara permanen di *SD Card Module* untuk pengarsipan dan analisis lebih lanjut.

Integrasi sensor ultrasonik dalam 3D Anemometer versi 2 memberikan peningkatan signifikan dalam akurasi dan stabilitas sistem. Sensor ini mampu mendeteksi pergerakan angin dengan sensitivitas tinggi, memberikan hasil yang lebih presisi dibandingkan versi sebelumnya. Selain itu, dengan adanya mikrokomputer, perangkat ini memiliki fleksibilitas lebih besar untuk pengelolaan data, memungkinkan data mentah dan hasil olahan disimpan dan diakses dengan lebih efisien. Dengan arsitektur yang lebih modern dan integrasi teknologi ultrasonik, 3D Anemometer versi 2 menjadi perangkat yang andal untuk pengukuran angin tiga dimensi dalam berbagai aplikasi penelitian lingkungan.

3.5.3 Microclimate Station

Seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.10 *Microclimate Station* versi 1 dirancang untuk mengukur berbagai parameter lingkungan, termasuk radiasi matahari, kecepatan dan arah angin, suhu, kelembapan, serta curah hujan.



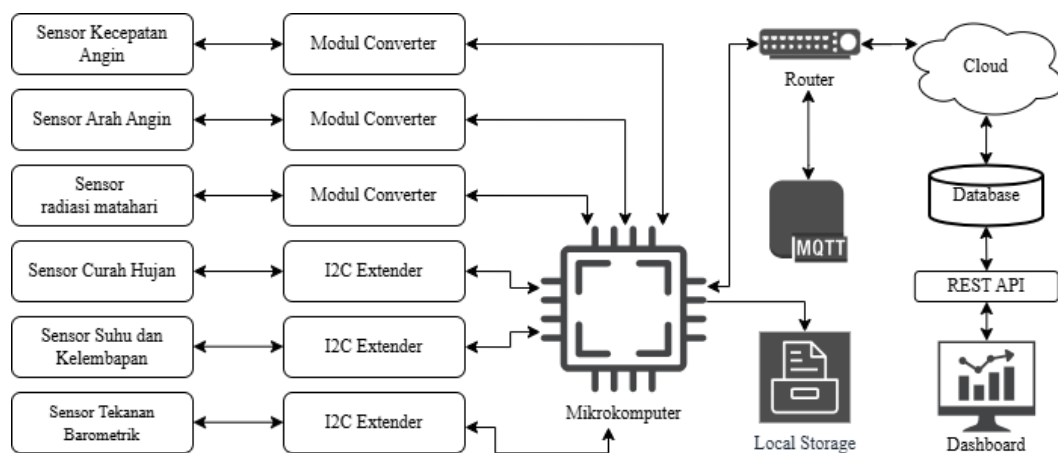
Gambar 3. 9 Diagram Blok Microclimate Station Versi 1

Perangkat ini mengintegrasikan berbagai sensor dengan mikrokontroler dan mikrokomputer, yang berfungsi sebagai pengolah data utama. Sensor utama yang digunakan untuk mengukur radiasi matahari, kecepatan angin, arah angin, suhu, kelembapan, curah hujan, serta sensor tambahan untuk memantau suhu dan kelembapan di dalam *mainboard case* terhubung melalui antarmuka komunikasi yang sesuai, memungkinkan perangkat untuk mengumpulkan dan memproses data dari lingkungan secara efisien. Data dari sensor-sensor ini dikirim ke mikrokontroler yang mengelola pengumpulan dan komunikasi data antar perangkat.

Mikrokontroler berfungsi sebagai modul komunikasi utama yang mengintegrasikan data dari berbagai sensor sebelum mengirimkannya ke mikrokomputer melalui komunikasi serial. Mikrokomputer bertugas membaca data serial yang dikirim oleh mikrokontroler sekaligus menyediakan sumber daya listrik untuk mikrokontroler. Dalam konfigurasi ini, mikrokontroler mengolah data dari empat sensor radiasi

matahari, kecepatan dan arah angin, suhu, serta kelembapan. Data hasil pembacaan oleh mikrokontroler kemudian diteruskan ke mikrokomputer untuk proses pengolahan lebih lanjut.

Mikrokomputer menjadi pusat pengolahan data utama yang menerima data dari mikrokontroler, memprosesnya, dan menyimpannya di *local storage* untuk pengarsipan. Data yang telah diproses juga dikirimkan ke sistem *cloud* melalui router, di mana data ini disimpan di database PostgreSQL untuk kebutuhan analisis dan pengelolaan jangka panjang. Data yang tersimpan dapat diakses melalui REST API dan divisualisasikan secara *real-time* melalui *dashboard*, memungkinkan pemantauan parameter lingkungan secara cepat dan mudah dipahami. Dengan memanfaatkan kombinasi mikrokontroler, mikrokomputer, dan konverter komunikasi, *Microclimate Station* versi 1 mampu mengintegrasikan berbagai sensor dengan stabilitas tinggi dan memastikan data dapat diolah serta disimpan dengan efisien. Sistem ini memberikan solusi lengkap untuk pengukuran parameter lingkungan, menjadikannya perangkat yang andal dalam mendukung penelitian di berbagai kondisi lapangan.



Gambar 3.10 Diagram Blok Microclimate Station Versi 2

Seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.11, *Microclimate Station* versi 2 merupakan pengembangan dari versi sebelumnya yang dirancang untuk meningkatkan jangkauan komunikasi sensor dan menyederhanakan sistem pengolahan data. Pada versi ini, perangkat mengintegrasikan berbagai sensor untuk

mengukur parameter lingkungan seperti kecepatan dan arah angin, radiasi matahari, curah hujan, suhu, kelembapan, serta tekanan udara.

Sensor-sensor yang terpasang pada perangkat ini menggunakan dua protokol komunikasi utama, yaitu RS485 dan I2C. Sensor-sensor berbasis RS485 dihubungkan ke sistem pengolahan data menggunakan konverter yang sesuai, sementara sensor berbasis I2C terhubung melalui I2C Extender, yang memungkinkan pemasangan sensor pada jarak yang lebih jauh tanpa mengurangi kecepatan atau akurasi pengukuran.

Mikrokomputer berfungsi sebagai pusat pengolahan data utama, yang menerima data dari berbagai sensor, memprosesnya, dan menyimpannya di local storage untuk pengarsipan lebih lanjut. Data yang telah diproses kemudian dikirimkan ke sistem cloud melalui protokol MQTT, yang memungkinkan akses data secara jarak jauh dan real-time melalui router. Penambahan I2C Extender dan konverter untuk RS485 to USB memberikan fleksibilitas lebih besar dalam pemasangan dan integrasi sensor, sekaligus meningkatkan stabilitas komunikasi antar perangkat.

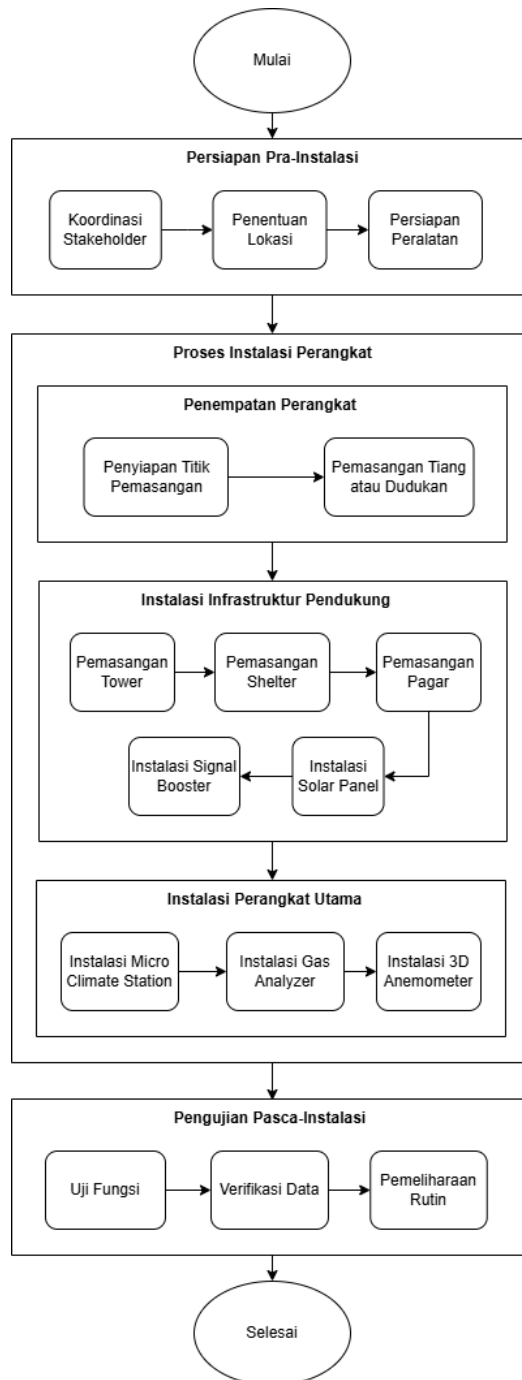
Dengan konfigurasi ini, *Microclimate Station* versi 2 memberikan informasi lingkungan yang lebih lengkap dan akurat, sementara integrasi dengan Mikrokomputer dan protokol MQTT memastikan data dapat dikelola dan diakses dengan efisien. Versi ini membawa peningkatan signifikan dalam cakupan pengukuran dan fleksibilitas sistem, menjadikannya perangkat yang andal untuk berbagai aplikasi penelitian lingkungan.

3.6 Prosedur Implementasi

Prosedur implementasi pada penelitian ini dirancang untuk memastikan keberhasilan instalasi perangkat di lokasi penelitian dan pengumpulan data yang akurat dan konsisten. Proses ini terdiri dari dua tahap utama, yaitu instalasi perangkat dan protokol pengumpulan data.

3.6.1 Instalasi Perangkat

Prosedur instalasi perangkat dilakukan secara sistematis untuk memastikan bahwa perangkat dapat berfungsi optimal di lokasi penelitian. Tahapan instalasi terdiri dari tiga bagian utama: persiapan pra-instalasi, proses instalasi perangkat, dan pengujian pasca-instalasi yang dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3.11 Diagram Alir Instalasi Perangkat

Pada tahap persiapan pra-instalasi, dilakukan koordinasi dengan *stakeholder* untuk memastikan peran dan tanggung jawab seluruh pihak yang terlibat, serta mempersiapkan dokumen izin atau kesepakatan dengan pihak terkait. Lokasi penelitian dipilih berdasarkan kriteria representatif, yaitu area dengan lahan produksi kelapa sawit yang berada di tengah kebun. Pohon kelapa sawit yang dipilih harus kokoh dan hampir tumbuh lurus untuk memastikan keandalan pengukuran. Lokasi tersebut dipilih untuk menghindari pohon yang miring atau hampir tumbang akibat kondisi tanah gambut. Selain itu, semua perangkat dan aksesoris pendukung, seperti kabel, baterai, dan alat pemasangan, diperiksa dan disiapkan secara lengkap sebelum instalasi dimulai.

Pada tahap proses instalasi perangkat, lokasi pemasangan dibersihkan dari vegetasi atau hambatan lain untuk memastikan perangkat dapat beroperasi tanpa interferensi. *Tower Fourangle* dengan ketinggian sekitar 15 meter dipasang menggunakan bahan tahan korosi yang sesuai untuk lingkungan lembap seperti tanah gambut, dengan fondasi kokoh untuk menjamin stabilitas perangkat. Infrastruktur pendukung, seperti *shelter*, dipasang untuk melindungi perangkat elektronik dan baterai dari cuaca ekstrem, dengan panel surya di atas *shelter* untuk menyediakan sumber daya. Pagar pelindung juga dipasang untuk mencegah gangguan dari hewan atau aktivitas manusia. Untuk meningkatkan stabilitas komunikasi data, perangkat penguat sinyal (*signal booster*) dipasang, dengan repeater di *shelter*, antena *indoor (omni ceiling)* di dekat *shelter*, dan antena *outdoor (Log Periodik LPDA)* di atas tower. Setelah infrastruktur pendukung selesai, perangkat utama mulai diinstal. *Microclimate Station* dipasang di tower pada ketinggian 8 meter untuk pengukuran parameter lingkungan. *Gas Analyzer* dipasang dengan stasiun 1 pada ketinggian 2 meter dan stasiun 2 pada ketinggian 15 meter (di atas kanopi pohon kelapa sawit). Perangkat 3D Anemometer dipasang bersebelahan dengan *Gas Analyzer*, mengikuti ketinggian stasiun 1 dan 2. Setiap perangkat dihubungkan dengan sumber daya dan jaringan komunikasi untuk memastikan operasional berjalan optimal.

Tahap terakhir adalah pengujian pasca-instalasi, yang mencakup tiga langkah utama. Pertama, dilakukan uji fungsi untuk memastikan bahwa seluruh perangkat beroperasi sesuai dengan spesifikasi teknis dan konfigurasi yang telah dirancang. Langkah ini mencakup pengujian setiap komponen dan koneksi sistem untuk mendeteksi potensi masalah teknis sebelum perangkat digunakan secara penuh. Kedua, dilakukan verifikasi data dengan memeriksa hasil pengukuran dari perangkat, memastikan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi dan konsistensi yang sesuai dengan standar pengukuran. Verifikasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa perangkat mampu menghasilkan data yang andal dan valid untuk mendukung analisis lebih lanjut. Ketiga, dilakukan penetapan jadwal pemeliharaan rutin untuk menjaga perangkat tetap dalam kondisi operasional yang optimal. Pemeliharaan mencakup pemeriksaan berkala terhadap komponen perangkat keras, sistem komunikasi, dan kebersihan perangkat untuk menghindari gangguan operasional akibat debu, korosi, atau faktor lingkungan lainnya. Dengan prosedur pengujian pasca-instalasi yang sistematis ini, instalasi perangkat dapat mendukung keberhasilan pengukuran parameter lingkungan secara efektif, akurat, dan berkelanjutan.

3.6.2 Protokol Pengumpulan Data

Protokol pengumpulan data dirancang untuk memastikan seluruh parameter lingkungan yang diukur dapat dicatat secara *real-time* dengan akurasi dan konsistensi yang tinggi. Data yang dikumpulkan mencakup konsentrasi gas rumah kaca (CO_2 dan CH_4), kecepatan dan arah angin, suhu, kelembapan, radiasi matahari, tekanan udara, dan curah hujan. Setiap perangkat memiliki interval waktu pengambilan data yang berbeda, disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan pengukuran. Gas Analyzer dan 3D Anemometer memiliki laju pengambilan data (*sensing rate*) sebesar 6–7 Hz, dengan akuisisi data dilakukan setiap 30 menit secara kontinu, kemudian memasuki mode tidak aktif (*idle*) selama 30 menit berikutnya. Sementara itu, Microclimate Station melakukan pengumpulan data setiap 1 menit secara berkelanjutan. Data dari perangkat langsung dikirim ke Mikrokomputer sebagai pusat pengolahan data menggunakan protokol komunikasi yang berbeda,

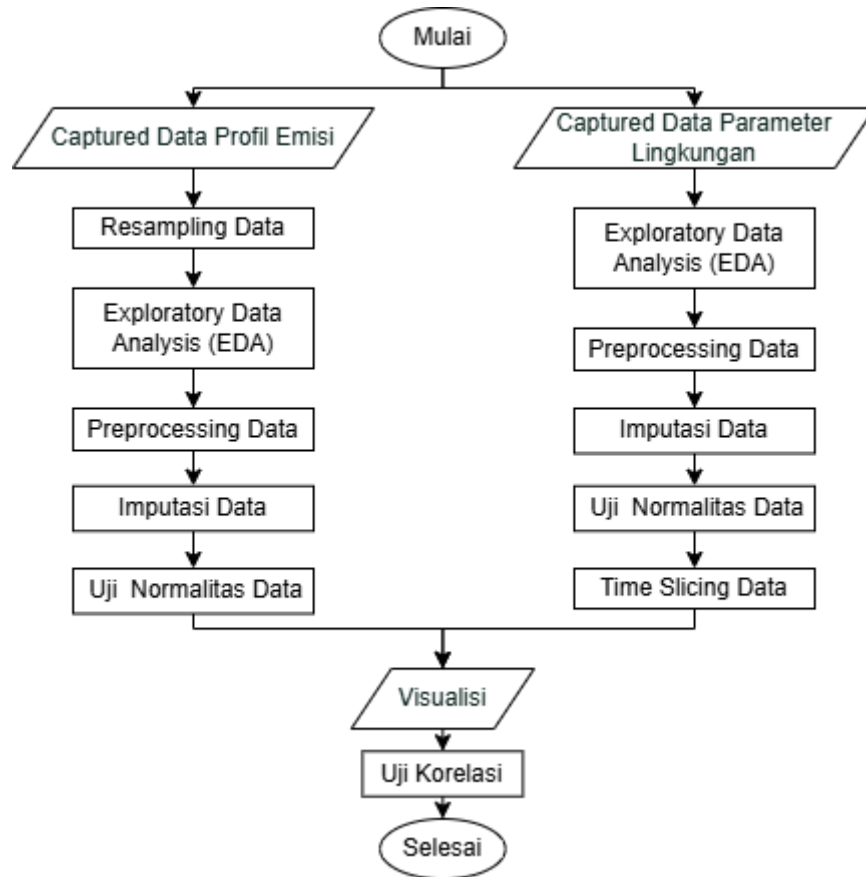
yaitu TCP/IP untuk *Gas Analyzer*, protokol serial untuk 3D Anemometer, dan protokol serial untuk *Microclimate Station*.

Setelah diterima di Mikrokomputer, data disimpan sementara dalam penyimpanan lokal untuk memastikan tidak ada kehilangan data selama proses transfer. Selanjutnya, data yang telah diproses dikirimkan ke sistem *cloud* untuk penyimpanan jangka panjang menggunakan database PostgreSQL. Untuk menghindari kehilangan data, mekanisme *backup* dilakukan secara berkala menggunakan Google Drive (GDrive). Data yang tersimpan dapat diakses melalui aplikasi berbasis web untuk divisualisasikan secara *real-time*, memudahkan pengguna dalam memantau kondisi lingkungan secara langsung. Protokol ini memastikan bahwa data yang dikumpulkan, diolah, dan disimpan sesuai dengan standar yang ditetapkan, mendukung penelitian emisi karbon dan parameter lingkungan secara akurat dan efisien.

3.7 Metodologi Analisis Data

Metodologi analisis data dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi hubungan antara data emisi dan faktor lingkungan yang mempengaruhinya. Data emisi yang diperoleh dari perangkat Gas Analyzer Station dianalisis untuk mengidentifikasi korelasi dengan faktor-faktor lingkungan, seperti suhu, kelembapan, tekanan udara, dan kecepatan angin dari perangkat Microclimate Station.

Gambar 3.13 menunjukkan Diagram Alir Analisis Data, yang menggambarkan tahapan-tahapan yang dilalui dalam proses analisis data pada penelitian ini. Diagram alir ini memberikan gambaran menyeluruh tentang alur yang digunakan untuk menganalisis data profil emisi dan data parameter lingkungan yang terkumpul selama periode pengamatan.



Gambar 3. 12 Diagram Alir Analisis Data

Proses dimulai dengan pengumpulan data (Captured Data Profil Emisi dan Captured Data Parameter Lingkungan). Setelah data terkumpul, dilakukan resampling data untuk menyesuaikan frekuensi pengambilan data agar konsisten dengan kebutuhan analisis. Selanjutnya, dilakukan Exploratory Data Analysis (EDA) untuk menganalisis pola-pola awal dalam data dan mendeteksi adanya anomali atau karakteristik yang perlu diperhatikan. Setelah EDA, tahap berikutnya adalah preprocessing data, di mana data yang terdeteksi sebagai outlier akan diganti dengan nilai NaN untuk kemudian diproses lebih lanjut. Proses imputasi data dilakukan untuk menggantikan nilai yang hilang dengan metode yang sesuai, seperti imputasi berdasarkan pola waktu atau interpolasi linear, guna memastikan kelengkapan data.

Tahap selanjutnya adalah uji normalitas data, di mana dilakukan evaluasi terhadap distribusi data untuk menentukan apakah data memenuhi asumsi distribusi normal. Jika data tidak terdistribusi normal, langkah selanjutnya adalah menggunakan

metode non-parametrik untuk analisis. Setelah itu, dilakukan time slicing data, yaitu pemotongan data berdasarkan interval waktu tertentu untuk menyelaraskan data emisi dengan data parameter lingkungan, sehingga memungkinkan analisis korelasi antara keduanya. Setelah melalui tahapan-tahapan ini, data siap untuk divisualisasikan guna memberikan gambaran yang lebih jelas tentang hubungan antar variabel. Terakhir, dilakukan uji korelasi untuk mengevaluasi hubungan antara data emisi dan faktor lingkungan, menggunakan metode korelasi yang sesuai, seperti Spearman, Kendall Tau, atau Distance.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa.

1. Berdasarkan hasil pengujian, penggunaan teknologi I2C extender dan UART extender menghasilkan rata-rata latensi sebesar 74.33 ms, rata-rata interval sensing sebesar 143 ms, dan rata-rata jitter sensing sebesar 0.69 ms. Terkait data loss, jumlah data yang berhasil dikumpulkan mencapai 302.112 baris, dengan 288 data hilang, yang menunjukkan tingkat keberhasilan akuisisi data sebesar 99.90%. Penggunaan teknologi I2C extender dan UART extender berhasil memperpanjang jangkauan komunikasi antar sensor hingga 20 meter tanpa menyebabkan kehilangan data yang signifikan.
2. Berdasarkan hasil uji korelasi Spearman, korelasi antara CO₂ dan Temperature 1 adalah -0.76, Pressure adalah -0.52, Pyrano adalah -0.58, H₂O adalah -0.36, dan Humidity adalah 0.74. Pada uji Kendall Tau, korelasi untuk Temperature 1 adalah -0.57, Pressure adalah -0.34, Pyrano adalah -0.42, H₂O adalah -0.25, dan Humidity adalah 0.54. Namun, pada uji Distance, sebagian besar korelasi antara CO₂ dan atribut lingkungan menunjukkan nilai positif yang lebih besar karena korelasi Distance mengukur kedekatan distribusi antara dua variabel, bukan hanya hubungan linier atau monotonik. Sebagai contoh, korelasi dengan Rainfall menunjukkan nilai 0.01, sementara pada korelasi lain nilai tersebut adalah 0. Secara keseluruhan, hasil uji korelasi menunjukkan bahwa CO₂ memiliki hubungan negatif dengan Temperature 1, Pressure, H₂O, dan Pyrano, serta hubungan positif dengan Humidity. Hal ini mengindikasikan bahwa

peningkatan suhu udara, tekanan atmosfer, kadar uap air, dan radiasi matahari berhubungan dengan penurunan konsentrasi CO_2 , sedangkan peningkatan kelembapan relatif berhubungan dengan peningkatan konsentrasi CO_2 .

3. Berdasarkan hasil uji korelasi, CO_2 tidak menunjukkan korelasi yang signifikan dengan atribut CH_4 , Rainfall, Wind Speed, dan Angle, yang nilai korelasinya sangat lemah atau mendekati nol. Hal ini menunjukkan bahwa faktor-faktor tersebut tidak memiliki pengaruh langsung yang signifikan terhadap emisi CO_2 dalam konteks penelitian ini. Untuk CH_4 , nilai korelasi tidak dapat dihitung karena data yang konstan (0) sepanjang periode pengamatan, yang menghalangi perhitungan korelasi antara CH_4 dan parameter lainnya.
4. Berdasarkan hasil uji Spearman, Kendall Tau, dan Distance, meskipun Kendall Tau lebih robust terhadap outlier dan distribusi data yang tidak normal, Spearman memberikan hasil yang lebih konsisten dalam mengukur hubungan negatif antara CO_2 dengan Temperature 1, Pressure, dan Pyrano, serta positif dengan Humidity. Korelasi Distance lebih sensitif terhadap kedekatan distribusi antar variabel, menghasilkan nilai positif yang lebih besar, terutama untuk variabel dengan korelasi lemah pada Spearman dan Kendall Tau, seperti Wind Speed dan Rainfall. Secara keseluruhan, meskipun Distance memberikan nilai korelasi yang sebagian lebih tinggi, Spearman lebih tepat untuk menganalisis hubungan monotonik yang signifikan, sehingga Spearman merupakan metode yang paling efektif dalam penelitian ini.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka pada penelitian selanjutnya disarankan:

1. Penggunaan machine learning untuk analisis dan prediksi emisi karbon dapat meningkatkan akurasi pengukuran emisi dan memberikan solusi lebih efisien dalam manajemen emisi di sektor perkebunan kelapa sawit.
2. Memilih algoritma yang tepat berdasarkan karakteristik data yang tersedia, untuk meningkatkan akurasi analisis korelasi, prediksi data, dan pengujian lainnya, serta mencoba metode korelasi lainnya untuk mengeksplorasi metode

yang paling sesuai dengan tipe data yang tersedia, guna memperoleh hasil analisis yang lebih optimal.

3. Penerapan uji statistika tambahan, seperti uji normalitas yang lebih beragam, atau uji multivariat, dapat diimplementasikan untuk memahami lebih dalam tentang karakteristik dan keandalan data. Uji tambahan ini akan memberikan wawasan lebih lanjut tentang distribusi data dan hubungan antar variabel, serta memastikan bahwa analisis yang dilakukan sesuai dengan asumsi yang diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. A. Tarigan, "Trade–Off Fungsi Produksi Pertanian dan Fungsi Konservasi Lahan Gambut," *Policy Brief Pertanian, Kelautan, dan Biosains Tropika*, vol. 3, no. 13, hlm. 149-154., 2021, doi: <https://doi.org/10.29244/agro-maritim.0301.149-154>.
- [2] P. Hawanda dan S. Sudiarti, "Implementasi Strategi Pengembangan Industri Sawit dalam Menghadapi Revolusi 4.0," *Jurnal Ilmu Manajemen, Ekonomi dan Kewirausahaan (JIMEK)*, vol. 3, no. 3, hlm. 172–184, Nov 2023, doi: <https://doi.org/10.55606/jimek.v3i3.2460>.
- [3] S. Buwono, D. T. Harjanti, P. T. Anasi, H. Wiyono, dan M. I. Apriliyana, "Carbon Stock Analysis in Peat Soil at Rasau Jaya Tiga Village," *Social, Humanities, and Educational Studies (SHES): Conference Series*, vol. 5, hlm. 186– 192, 2022, doi: <https://doi.org/10.20961/shes.v5i4.69049>.
- [4] G. Burba, *Eddy Covariance Method for Scientific, Regulatory, and Commercial Applications*. Lincoln: LI-COR Biosciences, 2022.
- [5] C. Davidson, Y. Sharif, M. Brown, S. Robinson, B. Cerfontaine, dan M. Ottolini, "Centrifuge testing of a silent piling concept using the push-in method," *ECPMG 2024: 5th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.53243/ECPMG2024-107>.
- [6] A. Alquaary dan H. Bayhan, "AB485: A Simplified Data Transfer Protocol for Process Control and Automation," *Journal of Electrical Electronics Engineering*, vol. 3, no. 3, hlm. 01–07, 2024.
- [7] T. J. Griffis *dkk.*, "Hydrometeorological sensitivities of net ecosystem carbon dioxide and methane exchange of an Amazonian palm swamp peatland," *Agric For Meteorol*, vol. 295, Des 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108167>.
- [8] M. Śniadkowski, "Increasing Transmission of Inter-Integrated Circuit in Home Automation Solutions," *Advances in Science and Technology*

- Research Journal*, vol. 16, no. 6, hlm. 50–54, 2022, doi: <https://doi.org/10.12913/22998624/155215>.
- [9] F. Kamalov dan H. Sulieman, “Time series signal recovery methods: comparative study,” *2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, hlm. 1–5, Okt 2021, doi: 10.1109/ISNCC52172.2021.9615669.
- [10] U. A. Bhatti *dkk.*, “Global production patterns: Understanding the relationship between greenhouse gas emissions, agriculture greening and climate variability,” *Environ Res*, vol. 245, Mar 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118049>.
- [11] V. J. Yahya, S. Sabiham, B. Pramudya, dan I. Las, “Identifikasi Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Emisi Karbon Di Lahan Gambut Tropis (Kasus Pada Perkebunan Kelapa Sawit di Kabupaten Siak),” *Biospecies*, vol. 12, no. 2, hlm. 20–27, Jul 2019, doi: <https://doi.org/10.22437/biospecies.v12i2.5319>.
- [12] A. Farida, S. Krido Saptomo, Y. Chadirin, B. Indra Setiawan, dan K. Osawa, “Pendugaan Emisi CO₂ dari Lahan Gambut dengan Menggunakan Model Artificial Neural Network (ANN),” *Jurnal keteknikan Pertanian*, vol. 7, hlm. 121–128, 2019, doi: 10.19028/jtep.07.2.121-128.
- [13] M. Nuriman, W. Adelina, dan R. Hafiz Zulfifar Alkadrie, “Analisis Daya Dukung Lingkungan Berdasarkan Evaluasi Kemampuan Lahan Sebagai Landasan Pengelolaan Perkebunan Kelapa Sawit Rakyat,” *Jurnal Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan*, vol. 10, hlm. 93, 2024, doi: <http://dx.doi.org/10.26418/pedontropika.v9i1.82863>.
- [14] S. Anggraini, N. Afriyanti, dan Y. W. Arifin, “Pendugaan Cadangan Karbon Kelapa Sawit Pada Kelas Umur Tanama Dewasa Dan Tua Pada Lahan Tanam Berpirit,” *AGRITECH*, no. 1, hlm. 1411–1063, 2022, doi: <https://doi.org/10.30595/agritech.v24i1.9173>.
- [15] B. M. Zawilski, “On evapotranspiration and eddy covariance measurements corrections,” 28 Februari 2020. doi: <https://doi.org/10.5194/bg-2020-43>.
- [16] D. Wang, K. Wang, X. Zheng, K. Butterbach-Bahl, E. Díaz-Pinés, dan H. Chen, “Applicability of a gas analyzer with dual quantum cascade lasers for simultaneous measurements of N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from cropland using the eddy covariance technique,” *Science of the Total Environment*, vol. 729, Agu 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138784>.
- [17] H. Purwanto, S. R. Andary, dan M. Andrianto, “Rekayasa Kecepatan Angin Wind Tunnel dan Gerak Wings pada Aerodinamika Berbasis Alat Ukur

- Anemometer,” *Jurnal Pengembangan Potensi Laboratorium*, vol. 1, no. 2, hlm. 61–66, Agu 2022, doi: 10.25047/plp.v1i2.3018.
- [18] Z. Zhang *dkk.*, “A dataset of microclimate and radiation and energy fluxes from the Lake Taihu Eddy Flux Network,” 17 Juni 2020. doi: <https://doi.org/10.5194/essd-2020-64>.
- [19] S. Kumar Mukhiya dan U. Ahmed, *Hands-on exploratory data analysis with Python*. Birmingham: Packt Publishing, 2020.
- [20] Y. Zhang dan P. J. Thorburn, “Handling missing data in near real-time environmental monitoring: A system and a review of selected methods,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 128, hlm. 63–72, Mar 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.09.033>.
- [21] S. Karomah, S. Nugroho, dan D. F. Faisal, “Kajian Beberapa Uji Kenormalan,” *e-Jurnal Statistika*, 2019, [Daring]. Tersedia pada: <https://sigitnugroho.id/e-Skripsi/0603 Kajian Beberapa Uji Kenormalan.pdf>
- [22] I. Sintia, M. Danil Pasarella, dan D. Andi Nohe, “Perbandingan Tingkat Konsistensi Uji Distribusi Normalitas Pada Kasus Tingkat Pengangguran Di Jawa,” *Prosiding Seminar Nasional Matematika dan Statistika, dan Aplikasinya*, vol. 2, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.fmipa.unmul.ac.id/index.php/SNMSA/article/view/844>
- [23] R. Akbar, U. S. Sukmawati, dan K. Katsirin, “Analisis Data Penelitian Kuantitatif (Pengujian Hipotesis Asosiatif Korelasi),” *Jurnal Pelita Nusantara*, vol. 1, no. 3, hlm. 430–448, Jan 2024, doi: 10.59996/jurnalpelitanusantara.v1i3.350.
- [24] M. G. Kendall, “A New Measure Of Rank Correlation,” *Biometrika*, vol. 30, no. 1–2, hlm. 81–93, Jun 1938, doi: 10.1093/biomet/30.1-2.81.
- [25] A. Chaudhuri dan W. Hu, “A fast algorithm for computing distance correlation,” *Comput Stat Data Anal*, vol. 135, hlm. 15–24, Jul 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csda.2019.01.016>.