

**INTEGRASI GAS ANALYZER, ANEMOMETER 3D DAN TEKNIK
KOMPUTASI EDGE UNTUK OPTIMASI SISTEM C-FLUX**

(Skripsi)

Oleh:

WISNU TUBAGUS

NPM 2115031054



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

**INTEGRASI GAS ANALYZER, ANEMOMETER 3D DAN TEKNIK
KOMPUTASI EDGE UNTUK OPTIMASI SISTEM C-FLUX**

**Oleh:
WISNU TUBAGUS**

**Hasil Penelitian
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

INTEGRASI GAS ANALYZER, ANEMOMETER 3D DAN TEKNIK KOMPUTASI EDGE UNTUK OPTIMASI SISTEM C-FLUX

Oleh
WISNU TUBAGUS

Pemantauan fluks karbon yang kredibel untuk kebutuhan monitoring–reporting–verification (MRV) menuntut akuisisi data berfrekuensi tinggi, sinkronisasi antar instrumen, dan keandalan pada area yang terbatas daya/jaringan. Perangkat *Eddy Covariance Station* (ECS) dengan Gas Analyzer dan 3D Anemometer beroperasi terpisah, rentan terhadap *clock drift*, ketidakselarasan *timestamp*, duplikasi data, dan *packet loss* saat beban jaringan meningkat. Akibatnya, kovarians angin–konsentrasi gas terdistorsi dan celah data melebar. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini mengembangkan prototipe *Carbon Flux Analyzer* (C-Flux), dengan sistem terpadu yang mengintegrasikan Gas Analyzer, 3D Anemometer, dan *edge computing* dalam satu arsitektur dengan *time based* bersama. Rancangan mencakup harmonisasi *timestamp* dan penggabungan alur data di sisi *edge*; prapemrosesan lokal (deteksi anomali, validasi rentang, agregasi 7 Hz); skema *store-and-forward* dengan *buffer* lokal; optimasi *firmware* dan komunikasi serial; serta Telemetri IoT menggunakan protokol MQTT dengan payload terstruktur. *Commissioning test* 7×24 jam dengan target akuisisi sebesar 2.116.800 data menunjukkan kinerja C-Flux lebih unggul dibanding ECS: latensi+jitter turun dari 0,95 ms (ECS) menjadi 0,48 ms (C-Flux); interval sampling stabil di 143 ms (C-Flux) dibanding 163,03 ms (ECS); kelengkapan data meningkat dari 87,28% (ECS) menjadi 99,90% (C-Flux) berkat buffering lokal yang menghapus paket hilang saat outage. Integrasi *edge* juga menurunkan overhead komunikasi dari 1.358,97 ms (ECS/TCP-IP) menjadi 224,11 ms (C-Flux/serial), sehingga hemat daya tanpa mengorbankan resolusi temporal. Secara keseluruhan, C-Flux menghasilkan lebih banyak data valid per waktu dengan kontinuitas lebih baik untuk estimasi kovarians. Kontribusi R&D meliputi desain referensi stasiun fluks terpadu berbasis *edge*, optimasi *firmware*/protokol untuk jaringan marjinal, dan bukti peningkatan kualitas serta kontinuitas data bagi MRV di perkebunan kelapa sawit.

Kata Kunci: *Gas Analyzer*, *3D Anemometer*, Komputasi Edge, Sistem Pemantauan Fluks Karbon, IoT.

ABSTRAK

INTEGRASI GAS ANALYZER, ANEMOMETER 3D DAN TEKNIK KOMPUTASI EDGE UNTUK OPTIMASI SISTEM C-FLUX

by
WISNU TUBAGUS

Credible monitoring–reporting–verification (MRV) of carbon fluxes requires high-frequency acquisition, synchronization, and reliability under field constraints on power and connectivity. In a modular Eddy Covariance Station (ECS), the Gas Analyzer and 3D Anemometer operate separately, making the system vulnerable to clock drift, timestamp misalignment, duplicate data, and packet loss as network load rises. Consequently, wind–scalar covariance is distorted and data gaps widen. To address these issues we developed the Carbon Flux Analyzer (C-Flux), an integrated system unifying the Gas Analyzer, 3D Anemometer, and edge computing in an architecture with a shared timebase. The design implements timestamp harmonization and stream fusion; local preprocessing (anomaly detection, range validation, 7 Hz aggregation); store-and-forward buffering during unstable links; and firmware plus serial-link optimizations to reduce latency, jitter, and packet overhead. IoT telemetry uses an optimized MQTT protocol with structured payloads. A 7×24-h commissioning test (target 2,116,800 records) demonstrates significant gains over ECS: latency+jitter fell from 0.95 ms (ECS) to 0.48 ms (C-Flux); sampling interval stabilized at 143 ms (C-Flux) versus 163.03 ms (ECS); and data completeness increased from 87.28% to 99.90% via local buffering eliminating outage packet loss. Edge integration reduced communication overhead from 1,358.97 ms (ECS/TCP-IP) to 224.11 ms (C-Flux/serial), lowering power demand without sacrificing temporal resolution. C-Flux delivers more valid data per unit time with improved continuity for covariance estimation. R&D contributions include a reference design for an edge-integrated flux station, firmware/protocol optimizations for marginal networks, and empirical field evidence of quality and continuity improvements for MRV and mitigation decisions in oil-palm plantations.

Keywords: *Gas Analyzer*, *3D Anemometer*, Edge Computing, Carbon Flux Monitoring System, IoT.

Judul Skripsi

: INTEGRASI GAS ANALYZER,
ANEMOMETER 3D DAN TEKNIK
KOMPUTASI EDGE UNTUK OPTIMASI
SISTEM C-FLUX

Nama Mahasiswa

: Wisnu Tubagus

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115031054

Program Studi

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik



1. Komisi Pembimbing

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

Herilhawati, 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

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

2. Dekan Fakultas Teknik

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

NIP.19750928/2001121 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 05 Agustus 2025

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Wisnu Tubagus

NPM : 2115031054

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan 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, 05 Agustus 2025



Wisnu Tubagus

NPM. 2115031054

RIWAYAT HIDUP



Saya, Wisnu Tubagus, lahir di Tulang Bawang pada tanggal 13 September 2002, merupakan anak kedua dari Bapak Agus Kusnadi dan Ibu Sri Wahyuni. Pendidikan dasar saya selesaikan di SD Negeri 1 Gedung Harapan pada tahun 2014, pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 1 Penawar Aji pada tahun 2017, dan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Meraksa Aji pada tahun 2020. Pada tahun 2021, saya diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, melalui jalur SBMPTN. Keputusan memilih Teknik Elektro sebagai jurusan didasarkan pada hobi saya dalam merakit alat elektronik, yang diturunkan dari ayah saya yang ahli di bidang elektronik. Selain itu, minat saya terhadap perkembangan teknologi modern, seperti Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI), semakin mendorong saya untuk menekuni jurusan ini. Selama menempuh pendidikan di jurusan Teknik Elektro, saya telah mempelajari berbagai mata kuliah yang mendalam mengenai prinsip dasar teknik elektro, pemrograman, dan aplikasi teknologi terkini. Saya juga aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan yang membantu memperluas wawasan di luar kurikulum akademik. Salah satu pengalaman berharga saya adalah menjadi anggota Forum Komunikasi Bidikmisi/KIP Universitas Lampung. Pada periode pertama, saya tergabung dalam divisi Media dan Informasi, di mana saya belajar bekerja sama dalam tim, mengedit poster dan video, serta menjadi fotografer dan videografer. Pada periode kedua, saya dipercaya sebagai Ketua Divisi Media dan Informasi, yang menuntut saya untuk mengembangkan kemampuan kepemimpinan, manajemen anggota, dan pengelolaan program kerja secara profesional.

Selain itu, saya juga bergabung dengan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro. Pada periode pertama, saya menjadi anggota Divisi Minat dan Bakat, di mana saya belajar menggali potensi diri sendiri maupun orang lain. Pada periode kedua, saya menjadi anggota Divisi Media dan Informasi, bertanggung jawab mengelola media sosial himpunan serta memastikan komunikasi dan publikasi berjalan efektif.

Di luar kegiatan organisasi, saya aktif mengikuti seminar, kompetisi, dan proyek penelitian. Pada semester 5, saya tergabung dalam tim PPK Ormawa 2023 untuk mengembangkan riset Smart Tambak, yang bertujuan menciptakan alat untuk mendeteksi parameter kualitas air, seperti suhu, salinitas, dan dissolved oxygen (DO). Saya juga terlibat dalam penelitian pengembangan perangkat Eddy Covariance untuk pengukuran karbon di udara, dengan tanggung jawab merancang optimasi sistem C-Flux Analyzer, gabungan antara perangkat Gas Analyzer dan 3D Anemometer. Proyek ini menjadi dasar dari skripsi saya dan memberikan pengalaman terbesar selama kuliah karena memungkinkan saya belajar secara mendalam tentang penelitian dan implementasi teknis.

Pada semester 6, saya mengikuti Program Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB) Kampus Merdeka yang diselenggarakan oleh Kemendikbudristek. Saya memilih Studi Independen di PT Bisa AI Academy dalam bidang Data Science. Melalui program ini, saya memperoleh pengalaman praktis dalam pembersihan data menggunakan Python, analisis statistik menggunakan R, serta penerapan konsep data science lainnya.

Seluruh pengalaman akademik, organisasi, dan penelitian tersebut telah membentuk saya menjadi individu yang berkomitmen, disiplin, dan siap menghadapi tantangan di bidang teknik elektro. Saat ini, saya memandang masa depan dengan optimisme dan tekad kuat untuk terus memberikan kontribusi positif, baik bagi perkembangan teknologi maupun masyarakat luas.

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur yang mendalam kupersembahkan skripsi ini kepada

Kedua Orang Tua Tercinta

Bapak Agus Kusnadi

Dan

Ibu Sri Wahyuni

Serta Kepada Saudara/i

Imas Kurnia Bandawati

Yang selalu memberikan dukungan, kasih sayang, dan dorongan moral yang tak terhingga selama perjalanan studi saya. Atas doa dan semangat yang selalu mengiringi setiap langkah saya dalam mengejar mimpi.

Dan juga rekan-rekan

Eddy Covariance Station Team

TELTI 2021

Teknik Elektro Angkatan 2021

HIMATRO UNILA

Forkom Bidikmisi/Kip-k Unila

Yang selalu memberikan dukungan motivasi, kerjasama, dan kekeluargaannya yang luar biasa selama proses studi ini.

MOTTO HIDUP

“Teruslah menuntut ilmu, karena pendidikan memberi arti pada hidup.”

(My Fahter, Agus Kusnadi)

“Orang kuat bukanlah yang menang dalam gulat, tetapi orang kuat adalah yang mampu menahan diri saat marah.”

(HR. Bukhari, no. 6114; Muslim, no. 2609)

“Hidup adalah persamaan yang tak pernah bisa diselesaikan, namun ada faktor-faktor tertentu di dalamnya yang bisa kita pahami.”

(Nikola Tesla)

“Aku tidak akan lari, aku tidak akan menarik kembali kata-kataku... itulah jalan ninjaku!”

(Naruto, Naruto Uzumaki)

“Mereka yang melanggar aturan adalah sampah, tapi mereka yang meninggalkan temannya lebih buruk daripada sampah.”

(Naruto, Kakashi Hatake)

“Rasa sakit adalah pemahaman sejati tentang dunia. Hanya mereka yang telah menderita yang benar-benar memahaminya.”

(Naruto, Pain / Nagato)

“Segala kelemahan di dunia ini berasal dari kurangnya kemampuan seseorang.”

(Tokyo Ghoul, Rize Kamishiro)

“Jika kau menang, kau hidup. Jika kau kalah, kau mati. Jika kau tidak bertarung, kau tidak bisa menang.”

(Attack on Titan, Eren Yeager)

SANWACANA

Puji syukur ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala karunia, hidayah, dan rahmat-Nya yang tiada terhingga, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi ini yang berjudul “Integrasi gas analyzer, anemometer 3d dan teknik komputasi edge untuk optimasi sistem c-flux” tepat pada waktunya. Laporan ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Shalawat dan salam semoga tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan umat beliau yang istiqomah mengikuti sunnahnya. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada keluarga, teman-teman, dan semua pihak yang telah memberikan dukungan baik secara pemikiran maupun moral dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Tanpa bantuan dan dorongan dari mereka, saya tidak akan dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah Subhanahu wa Ta'ala, Sang Pemberi kekuatan, petunjuk, dan kesabaran. Terima kasih atas limpahan rahmat, hidayah, dan kesempatan yang Engkau berikan sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih telah menjadi penopang ketika penulis menghadapi kesulitan dan ketidakpastian, serta sumber kekuatan dan ketenangan di setiap langkah perjalanan akademik ini.
2. Almarhum Ayahanda Agus Kusnadi dan Ibunda Sri Wahyuni, yang telah memberikan kasih sayang, doa, dan dukungan sepanjang hidup penulis. Meskipun ayahanda telah tiada, warisan kasih sayang, bimbingan, dan motivasinya tetap menjadi sumber kekuatan bagi penulis untuk terus berusaha dan menyelesaikan skripsi ini. Segala pencapaian ini juga merupakan buah dari perhatian dan kasih sayang orang tua yang senantiasa menemani perjalanan hidup penulis.
3. Kakak Imas Kurnia Banda Wati yang telah memberikan penulis motivasi dan senantiasa memberikan semangat selama berkuliah.

4. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung, sekaligus Dosen Pembimbing Pendamping.
6. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
7. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung
8. Bapak Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Telekomunikasi dan Teknologi Informasi, sekaligus dosen pembimbing pertama, yang telah banyak membimbing, memberi dukungan, memberikan kritik, saran, dan motivasi yang bermanfaat bagi penulis.
9. Bapak Mona Arif Muda, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua penulis, yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan skripsi. Dukungan dan perhatian Bapak sangat membantu penulis dalam menyelesaikan laporan ini dengan baik.
10. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji, yang telah memberikan masukan, kritik, saran, serta perhatian yang sangat berharga bagi penyempurnaan skripsi ini.
11. Ibu Ing. Melvi, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung., sekaligus sebagai sosok Ibu selama masa perkuliahan yang telah banyak membimbing, memberi dukungan, dan membantu penulis selama menjalani kuliah.
12. Seluruh Dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan
13. Apri Christia Ningrum, yang selalu menemani penulis selama proses penyusunan skripsi dengan kesabaran, perhatian, dan dukungan yang tak pernah putus. Kehadiranmu memberikan semangat, tawa, dan ketenangan di saat-saat penulis menghadapi tantangan. Dukunganmu membuat

perjalanan ini terasa lebih ringan dan berkesan, serta menjadi sumber motivasi yang istimewa bagi penulis hingga skripsi ini terselesaikan.

14. Tirta, Rhamadani, Imam, Unedo, Eikel, Jefry, Benyamin, dan Marccel, yang selalu menjadi teman seperjuangan selama masa kuliah. Kehadiran kalian penuh canda, dukungan, dan semangat membuat perjalanan akademik penulis lebih berwarna dan bermakna. kebersamaan kalian menjadi sumber motivasi serta kenangan indah yang akan selalu dikenang oleh penulis.
15. Sahabat dekatku, tim Riset Sawit: Rizky, Aldi, Afni, dan Sofya, yang telah menjadi bagian penting dalam setiap langkah penelitian. Kerja sama, ide, dan dukungan kalian membuat proses penelitian lebih lancar, penuh semangat, dan meninggalkan kenangan yang tak terlupakan.
16. Seluruh anggota Forkom Bidikmisi/KIP Universitas Lampung, yang telah memberikan dukungan, kebersamaan, dan semangat, sehingga perjalanan kuliah penulis menjadi lebih bermakna dan berkesan.
17. Keluarga besar HIMATRO UNILA dan Teknik Elektro Angkatan 21, sahabat karibku, kenangan kita bersama yang akan aku kenang selama berjuang dalam masa studi.

Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu dan terlibat langsung maupun tidak langsung yang telah membantu penulis dalam pembuatan skripsi.

Semoga Tuhan membalas semua perbuatan dan kebaikan yang telah diberikan kepada penulis sampai dengan terselesaikannya skripsi ini. Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan, baik dari segi penyusunan maupun pemilihan kata. Maka dari itu penulis terbuka menerima masukan kritik dan saran yang dapat membangun penulis kedepannya. Semoga penulisan skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Bandar Lampung, 05 Agustus 2025

Wisnu Tubagus

NPM. 2115031054

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Penelitian Terdahulu	6
2.2. Sistem <i>Gas Analyzer</i>	7
2.3. Sistem <i>3D Anemometer</i>	8
2.4. Mikrokontroler dalam Sistem Pemantauan.....	9
2.5. Perancangan PCB.....	11
2.5.1. PCB pada sistem IoT.....	11
2.5.2. Justifikasi Perancangan PCB dalam Penelitian Ini	12
2.5.3. Perancangan PCB Menggunakan EasyEDA.....	13
2.6. Optimasi Komunikasi dalam Sistem Data <i>C-FLUX</i>	13
2.6.2. Komunikasi <i>TCP/IP</i>	14
2.7. Optimasi distribusi daya pada system C-FLUX.....	16
2.7.1. Penggunaan Battery Eliminator Circuit	16
2.7.2. Prinsip Kerja <i>Battery Eliminator Circuit</i> (BEC).....	16
2.7.3. Manfaat BEC dalam Distribusi Daya yang Lebih Stabil	17
2.7.4. Perbandingan dengan Metode Distribusi Daya Sebelumnya	17
2.8. Optimasi Pengolahan Data dengan Komputasi Edge.....	18

2.8.3.	Spesifikasi Mikrokomputer.....	19
BAB III METODE PENELITIAN.....		21
3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.2.	Capstone Project.....	21
3.3.	Alat dan Bahan.....	23
3.3.1.	Perangkat keras	23
3.3.2.	Perangkat lunak.....	24
3.4.	Perancangan Sistem	24
3.4.1.	Blok Diagram Sistem	24
3.4.2.	Metode Integrasi <i>Gas Analyzer</i> dan <i>3D Anemometer</i>	26
3.5.	Perancangan PCB.....	27
3.5.1.	Diagram skematik PCB.....	27
3.5.2.	Implementasi <i>Battery Eliminator Circuit</i> dalam PCB	28
3.6.	<i>Pre-processing</i> Data.....	29
3.6.1.	Metode Pembersihan Data	29
3.6.1.1.	<i>Handling Missing Value</i>	30
3.6.1.2.	Deteksi <i>Outlier</i> Menggunakan <i>Interquartile Range</i> (IQR)....	30
3.6.1.3.	Penghapusan Nilai Duplikat.....	31
3.6.2.	Metode Sampling Data.....	31
3.7.	Metode Pengujian dan Evaluasi Sistem	32
3.7.1.	Evaluasi Kinerja mikrokontroler dalam Proses <i>Sensing</i>	32
3.7.1.1.	Evaluasi Pengiriman Data mikrokontroler.....	32
3.7.2.	Evaluasi Komunikasi Data.....	33
3.7.3.	Evaluasi Konsumsi dan Efisiensi Distribusi Daya.....	34
3.7.4.	Evaluasi Kinerja Mikrokomputer.....	34
3.7.5.	Validasi Hasil <i>Pre-processing</i> Data	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		37
4.1.	Optimasi Sistem	37
4.1.1.	Sistem Sebelum Optimasi	38
4.1.2.	Sistem setelah optimasi.....	39
4.2.	Hasil Perbandingan Sistem Lama dengan Sistem Baru	40
4.2.1.	Perbandingan <i>Sensing time interval</i>	40

4.2.2.	Perbandingan <i>Sensing time jitter</i>	43
4.2.3.	Perbandingan Latensi Total.....	46
4.2.4.	Perbandingan <i>data rate</i>	48
4.2.5.	Perbandingan <i>Packet loss</i>	50
4.2.6.	Perbandingan Data Hasil.....	52
4.3.	Evaluasi Performa Komputasi Edge	56
4.3.1.	Evaluasi data hasil Cleaning	57
4.3.2.	Evaluasi data hasil Sampling	59
4.3.3.	Evaluasi beban kerja mikrokomputer.....	60
4.4.	Evaluasi distribusi daya.....	63
4.4.1.	Perbandingan konsumsi dan efisiensi distribusi daya	65
4.5.	Evaluasi kondisi perangkat	68
BAB V PENUTUP.....		70
5.1.	Kesimpulan	70
5.2.	Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA		72

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Sistem Gas Analyzer	7
Gambar 2.2 Diagram Blok 3D Anemometer Versi 1	9
Gambar 2.3 Chip STM32 Mikrokontroler	10
Gambar 2.4 Komunikasi Serial	14
Gambar 2.5 Komunikasi TCP/IP	15
Gambar 3.1 Diagram Capstone Project Eddy Covariance Station (ECS).....	21
Gambar 3.2 Blok Diagram sistem C-FLUX Analyzer.....	25
Gambar 3.3 Skematik PCB C-FLUX Analyzer	27
Gambar 4.1 Diagram alir sistem sebelum optimasi	38
Gambar 4.2 Diagram alir sistem setelah optimasi	39
Gambar 4.3 Grafik perbandingan Sensing time interval.....	42
Gambar 4.4 Grafik perbandingan Sensing time jitter	45
Gambar 4.5 Grafik perbandingan latensi total	47
Gambar 4.6 Grafik perbandingan data rate	49
Gambar 4.7 Grafik perbandingan Packet loss.....	51
Gambar 4.8 Grafik perbandingan data hasil CO ₂	53
Gambar 4.9 Grafik perbandingan data hasil suhu udara	55
Gambar 4.10 Diagram alir komputasi edge	56
Gambar 4.11 Grafik perbandingan sebelum dan sesudah cleaning data.....	58
Gambar 4.12 Grafik perbandingan sebelum dan sesudah sampling data.....	60
Gambar 4.13 Grafik beban kerja mikrokomputer	62
Gambar 4.14 Distribusi daya sistem lama.....	64
Gambar 4.15 Distribusi daya sistem baru	65
Gambar 4.16 Grafik perbandingan efisiensi daya sistem lama dan sistem baru...	67
Gambar 4.17 Grafik kondisi suhu dan kelembapan perangkat	69

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Fungsi Sensor di Perangkat Gas Analyzer	8
Tabel 2.2 Spesifikasi Mikrokontroler	11
Tabel 2.3 Perbandingan Distribusi Daya antara Buck Converter dan BEC	17
Tabel 2.4 Spesifikasi Mikrokomputer	20
Tabel 3.1 Perangkat keras penelitian	23
Tabel 3.2 Perangkat lunak penelitian	24
Tabel 3.3 Jenis Sensor dan Metode Komunikasi dengan mikrokontroler	26
Tabel 3.4 Distribusi Tegangan dari BEC ke Komponen Sistem	28
Tabel 3.5 Parameter Evaluasi Beban Mikrokomputer	35
Tabel 3.6 Parameter Evaluasi Validasi Hasil Pre-Processing	36
Tabel 4.2 Perbandingan Sensing time interval	41
Tabel 4.3 Perbandingan Sensing time jitter	44
Tabel 4.4 Perbandingan latensi total	46
Tabel 4.5 Perbandingan data rate	49
Tabel 4.6 Perbandingan data hasil CO ₂	52
Tabel 4.7 Perbandingan data hasil suhu udara	54
Tabel 4.8 Evaluasi data hasil CO ₂ sebelum dan sesudah cleaning	57
Tabel 4.9 Evaluasi data hasil CO ₂ sebelum dan sesudah sampling	59
Tabel 4.10 Evaluasi beban kerja mikrokomputer	61
Tabel 4.11 Perbandingan konsumsi daya dan efisiensi distribusi daya	66
Tabel 4.12 kondisi suhu dan kelembapan perangkat	68

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pemantauan emisi karbon merupakan aspek krusial dalam penelitian lingkungan, terutama dalam mengukur fluks karbon yang dipengaruhi oleh faktor atmosfer. *Gas Analyzer* digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, H₂O, serta parameter lingkungan lainnya, seperti kelembapan udara, tekanan udara, dan suhu. Sementara itu, *3D Anemometer* berperan dalam mengukur kecepatan serta arah angin yang memengaruhi penyebaran gas di atmosfer [1]. Keakuratan dan efisiensi sistem pemantauan menjadi sangat penting untuk memastikan data yang diperoleh dapat digunakan dalam analisis secara *real-time*.

Sistem pemantauan yang digunakan saat ini masih menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam aspek integrasi perangkat, efisiensi daya, serta pengolahan data secara otomatis. *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* masih beroperasi sebagai dua sistem terpisah dengan mikrokontroler dan metode komunikasi yang berbeda, yang menyebabkan kompleksitas dalam pengelolaan perangkat serta kurang optimalnya komunikasi data. Selain itu, konsumsi daya yang tidak efisien dapat berdampak pada keterbatasan operasional dalam jangka panjang. Tantangan lainnya adalah *pre-processing* data yang masih dilakukan secara manual, sehingga memperlambat analisis dan meningkatkan beban kerja pengguna. Tanpa sistem yang terintegrasi dengan baik, pemantauan emisi karbon berisiko mengalami keterlambatan dalam pengolahan informasi yang dibutuhkan untuk analisis lebih lanjut.

Sebagai upaya mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan C-FLUX, sebuah sistem pemantauan yang mengintegrasikan *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* dalam satu perangkat yang lebih efisien. Integrasi ini

bertujuan untuk menyederhanakan struktur perangkat keras, meningkatkan efisiensi daya, serta mengoptimalkan komunikasi data guna memastikan transmisi yang stabil dan andal. Selain itu, penerapan teknik komputasi edge pada sistem ini memungkinkan pemrosesan data secara langsung di mikrokomputer, sehingga analisis dapat dilakukan lebih cepat tanpa perlu bergantung pada perangkat eksternal.

Selain meningkatkan efisiensi perangkat keras, penelitian ini juga berfokus pada otomatisasi *pre-processing* data, yang mencakup pembersihan serta validasi data untuk memastikan kualitas informasi sebelum digunakan dalam analisis lebih lanjut. Dengan adanya integrasi sistem dan optimasi pengolahan data berbasis edge computing, Sistem C-FLUX diharapkan mampu menjadi solusi pemantauan emisi karbon yang lebih efisien, responsif, serta dapat diterapkan dalam berbagai penelitian lingkungan berbasis IoT secara *real-time*.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Bagaimana mengintegrasikan *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* dalam satu sistem untuk meningkatkan efisiensi akuisisi data serta optimasi kinerja perangkat?
- 2) Bagaimana strategi perancangan dan implementasi sistem dapat meningkatkan efisiensi distribusi daya serta komunikasi data guna mendukung pemrosesan *real-time*?
- 3) Bagaimana optimasi *firmware* mikrokontroler dalam menangani akuisisi, transmisi, dan pengolahan data secara langsung untuk memastikan keandalan sistem?
- 4) Bagaimana optimasi teknik komputasi edge dapat meningkatkan efisiensi analisis data serta kualitas hasil pemrosesan dalam sistem C-FLUX?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Mengintegrasikan *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* dalam satu sistem untuk meningkatkan efisiensi akuisisi data serta menyederhanakan arsitektur perangkat.
- 2) Merancang dan mengimplementasikan sistem dengan distribusi daya yang lebih optimal serta komunikasi data yang efisien guna mendukung pemrosesan *real-time*.
- 3) Mengoptimalkan *firmware* mikrokontroler dalam menangani akuisisi, transmisi, serta pengelolaan data guna meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem.
- 4) Mengoptimalkan teknik komputasi edge dalam pengolahan data guna meningkatkan efisiensi analisis serta memastikan kualitas hasil pemrosesan pada sistem C-FLUX.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam berbagai aspek. Secara akademis, penelitian ini memperluas pemahaman tentang integrasi perangkat dan optimasi sistem berbasis IoT untuk pemantauan emisi karbon secara *real-time*. Dari sisi teknologi, penelitian ini memperkenalkan implementasi komputasi edge untuk meningkatkan efisiensi pemrosesan data, serta penggunaan teknik integrasi perangkat keras dan komunikasi data yang lebih efisien. Dalam konteks lingkungan, sistem yang dikembangkan berpotensi meningkatkan akurasi pemantauan fluks karbon, yang penting untuk studi perubahan iklim dan kebijakan pengurangan emisi. Secara praktis, penelitian ini memberikan solusi untuk pengelolaan dan pemeliharaan sistem pemantauan yang lebih sederhana, hemat daya, serta dapat diandalkan untuk aplikasi pemantauan lingkungan yang lebih luas.

1.5. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Penelitian ini berfokus pada pengembangan dan optimasi sistem pemantauan emisi karbon *C-FLUX*, yang mengintegrasikan *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* dalam satu perangkat. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi perangkat keras, komunikasi data, dan pengolahan data secara *real-time*, sehingga lebih sederhana, responsif, dan mudah dikelola.

Adapun ruang lingkup penelitian ini mencakup beberapa aspek berikut:

- 1) Integrasi perangkat keras dilakukan dengan menyatukan *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* dalam satu sistem, sehingga sistem menjadi lebih ringkas dan efisien tanpa mengubah prinsip kerja sensor dalam mengukur emisi gas dan parameter atmosfer.
- 2) Efisiensi distribusi daya dan komunikasi data ditingkatkan melalui perancangan sistem yang lebih optimal, sehingga memastikan sistem dapat bekerja lebih stabil dan andal dalam mendukung proses pemantauan secara berkelanjutan.
- 3) Komputasi edge diimplementasikan langsung di dalam mikrokomputer, menggantikan metode manual menggunakan perangkat eksternal. Evaluasi dilakukan dengan mengukur performa sistem dalam aspek penggunaan CPU, RAM dan suhu, untuk memastikan sistem dapat beroperasi secara efisien dan mendukung analisis data secara optimal.

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan laporan penelitian ini disusun secara sistematis dalam beberapa bab untuk menjelaskan secara rinci tahapan penelitian yang dilakukan. Adapun sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini mengandung latar belakang yang menjelaskan mengenai pentingnya pemantauan emisi karbon, serta permasalahan yang ada saat ini. Kemudian,

rumusan masalah yang menjadi fokus penelitian, tujuan yang ingin dicapai, manfaat penelitian, serta ruang lingkup dan batasan masalah untuk menjaga fokus penelitian agar tetap relevan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini mengulas teori-teori yang mendasari penelitian ini, termasuk konsep dasar mengenai *Gas Analyzer*, *3D Anemometer*, komputasi edge, dan sistem komunikasi data. Selain itu, bab ini juga mencakup tinjauan penelitian terdahulu yang relevan untuk memberikan dasar bagi penelitian ini dan menunjukkan bagaimana penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan secara rinci mengenai metode yang digunakan dalam penelitian, termasuk perancangan sistem, pengujian performa perangkat, serta pengolahan data. Ini juga mencakup alat dan bahan yang digunakan dalam eksperimen serta desain sistem secara keseluruhan, yang memungkinkan pemahaman lebih lanjut tentang cara kerja sistem yang dikembangkan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, hasil dari eksperimen yang telah dilakukan akan dipaparkan dan dianalisis secara mendalam. Bab ini juga membahas evaluasi kinerja sistem sebelum dan setelah optimasi, perbandingan data, dan evaluasi performa yang diukur berdasarkan kriteria tertentu seperti *Data rate* , latensi, dan konsumsi daya.

BAB V PENUTUP

Bab ini menyajikan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan, serta saran untuk pengembangan lebih lanjut dan aplikasi dari sistem yang telah dikembangkan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

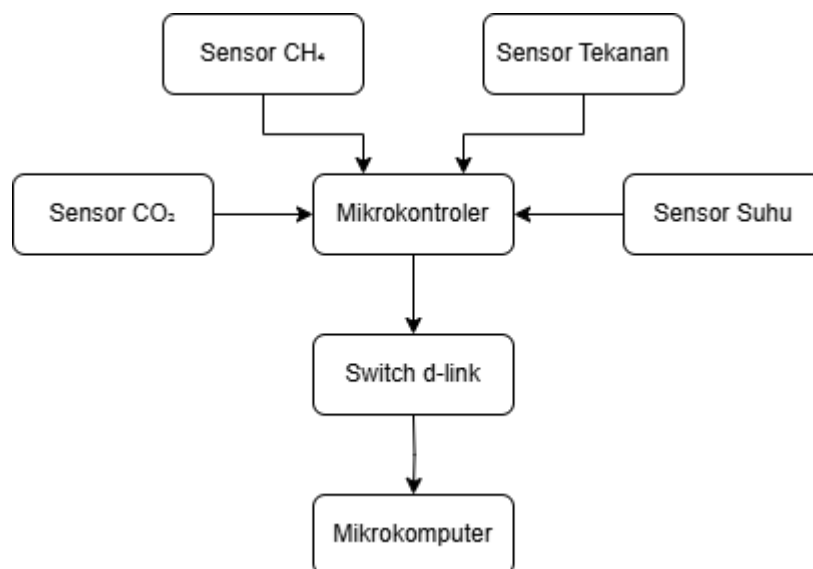
Pada penelitian terdahulu yang berjudul "*An Edge Computing and Ambient Data Capture System for Clinical and Home Environments*" yang ditulis oleh Suresha, P.B., Hegde, C., Jiang, Z., dan Clifford, G.D. pada tahun 2022, dijelaskan mengenai sistem komputasi edge yang dikembangkan untuk memantau pasien dalam lingkungan klinik dan rumah. Sistem ini menggunakan perangkat keras yang terjangkau dan tersedia secara luas, seperti Raspberry Pi, untuk menangkap dan menganalisis data dari berbagai sensor non-kontak seperti kamera inframerah, mikrofon USB, sensor suhu dan kelembapan, serta pelacak lokasi berbasis Bluetooth. Penelitian ini menyoroti lima aplikasi utama dari sistem tersebut, termasuk estimasi okupansi dan fenotip aktivitas manusia, klasifikasi alarm peralatan medis, pelacakan geolokasi manusia, pencatatan cahaya ambient, serta pencatatan suhu dan kelembapan ambient. Dengan tingkat akurasi 94% untuk estimasi okupansi dan 98,7% untuk pelacakan geolokasi manusia, sistem ini menunjukkan kemampuan untuk melakukan pemantauan pasien secara privasi-preserving dan non-intrusif di lingkungan klinik dan rumah.

Penelitian lainnya yang berjudul "*Data Communication between Omron CP1L-E PLC and Arduino Portenta H7 using Modbus TCP Protocol*" yang ditulis oleh Nizar Abdul Mathin, Asep Andang, dan Firmansyah Maulana Sugiartana pada tahun 2024, membahas komunikasi data antara perangkat PLC Omron CP1L-E dengan mikrokontroler Arduino Portenta H7 melalui internet menggunakan protokol Modbus TCP. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu jeda (pause) pada pengiriman data terhadap kinerja komunikasi, serta mengukur parameter *Quality of Service* (QoS) seperti *Throughput*, *delay*, *Jitter*, dan *Packet*

loss. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu jeda yang lebih panjang dapat mempengaruhi kinerja komunikasi, dengan percobaan pada 60 ms menunjukkan tidak terjadi bottleneck dan kinerja komunikasi masuk dalam kategori baik berdasarkan standar TIPHON.

2.2. Sistem *Gas Analyzer*

Gas Analyzer adalah perangkat yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur konsentrasi gas tertentu di udara, terutama gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4), serta parameter lingkungan lainnya seperti suhu, kelembapan, tekanan udara, dan kadar uap air (H_2O). Perangkat ini terdiri dari berbagai sensor yang bekerja secara simultan untuk memperoleh data yang akurat tentang komposisi gas dalam suatu lingkungan. Sensor-sensor ini dihubungkan ke mikrokontroler, yang bertugas membaca data dari sensor dan mengirimkannya ke mikrokomputer untuk diproses lebih lanjut. Dalam penelitian ini, *Gas Analyzer* digunakan sebagai bagian dari sistem pemantauan fluks karbon, di mana data yang dihasilkan akan digunakan untuk memahami dinamika emisi gas di suatu wilayah secara *real-time* [4].



Gambar 2.1 Sistem *Gas Analyzer*

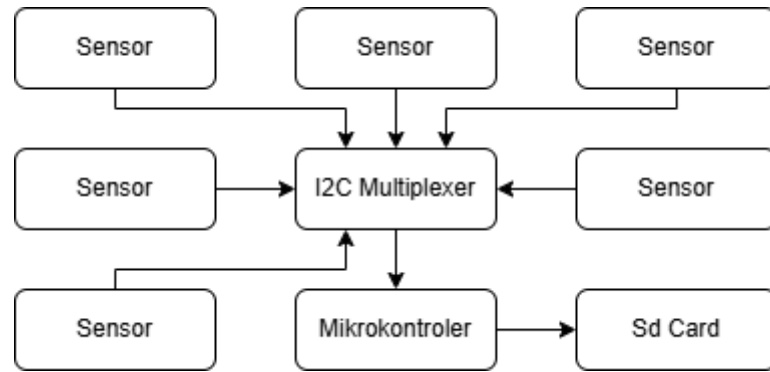
Tabel 2.1 Fungsi Sensor di Perangkat *Gas Analyzer*

No	Sensor	Fungsi
1	Sensor CO ₂	Mengukur konsentrasi gas karbon dioksida (CO ₂)
2	Sensor CH ₄	Mendeteksi gas metana (CH ₄)
3	Sensor Suhu	Mengukur suhu dan kelembapan udara di lingkungan
4	Sensor Tekanan	Mengukur tekanan udara
5	Sensor Suhu	Mengukur suhu dan kelembapan di perangkat

Berdasarkan Gambar 2.1 Sistem *Gas Analyzer* dan Tabel 2.1 Fungsi Sensor di Perangkat C-Flux Analyzer, perangkat bekerja dengan mendeteksi dan mengukur konsentrasi gas di lingkungan menggunakan sensor seperti Sensor CO₂ untuk karbon dioksida (CO₂), Sensor CH₄ untuk metana (CH₄), Sensor Suhu dan kelembapan untuk suhu dan kelembapan udara di lingkungan, Sensor Tekanan untuk tekanan udara, dan Sensor Suhu untuk suhu dan kelembapan di perangkat. Data dari sensor-sensor ini diproses oleh mikrokontroler sebelum diteruskan ke Mikrokomputer, yang bertugas mengelola pengiriman data ke *cloud* untuk disimpan dalam *database* dan ditampilkan di *dashboard* berbasis website.

2.3. Sistem *3D Anemometer*

3D Anemometer adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur kecepatan dan arah angin dalam tiga dimensi, memungkinkan analisis yang lebih akurat terhadap pola pergerakan udara dibandingkan dengan anemometer konvensional yang hanya mengukur dalam satu sumbu [5]. Dalam sistem ini, *3D Anemometer* terdiri dari beberapa Digital Airspeed Sensor yang ditempatkan pada berbagai arah untuk menangkap kecepatan angin dari berbagai sisi, memungkinkan perhitungan vektor kecepatan angin secara lebih komprehensif.



Gambar 2.2 Diagram Blok *3D Anemometer* Versi 1

Pada Gambar 2.2 ditunjukkan diagram blok sistem *3D Anemometer* versi 1. Sensor-sensor kecepatan angin digital dihubungkan ke mikrokontroler utama, yang bertugas membaca dan mengelola data dari sensor. Karena jumlah sensor yang digunakan cukup banyak, sistem menggunakan I2C Multiplexer (I2C Mux) untuk memungkinkan komunikasi dengan beberapa sensor yang menggunakan protokol I2C, sehingga mengoptimalkan pengelolaan data dari seluruh sensor tanpa konflik alamat.

Untuk pencatatan data, sistem ini dilengkapi dengan SD Card Module, yang berfungsi sebagai media penyimpanan data angin yang telah diproses oleh mikrokontroler. Selain itu, terdapat RTC (*Real-time Clock*) yang digunakan untuk memberikan *timestamp* pada setiap data yang direkam, sehingga memungkinkan analisis kecepatan dan arah angin berdasarkan waktu. Dengan desain ini, sistem *3D Anemometer* mampu mengukur karakteristik angin secara *real-time* dan menyimpannya untuk analisis lebih lanjut, menjadikannya komponen penting dalam pemantauan lingkungan dan penelitian terkait fluks karbon.

2.4. Mikrokontroler dalam Sistem Pemantauan

Mikrokontroler adalah sistem komputer miniatur yang mengintegrasikan unit pemroses (CPU), memori, dan periferal input/output dalam satu sirkuit terpadu. Perangkat ini dirancang untuk mengendalikan fungsi-fungsi spesifik dalam sistem

tertanam, seperti pengendalian mesin, perangkat medis, dan sistem otomasi industri [6]. Dalam konteks pemantauan emisi karbon, mikrokontroler berperan penting dalam mengintegrasikan sensor-sensor pada sistem *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer*, memungkinkan pengukuran konsentrasi gas rumah kaca serta parameter meteorologi secara *real-time*.

Mikrokontroler yang digunakan dalam penelitian ini merupakan chip STM32 yang dilengkapi prosesor dual-core Cortex-M7 dan Cortex-M4.. Kombinasi ini memungkinkan pemrosesan paralel, meningkatkan efisiensi dalam akuisisi data sensor secara *real-time*. Mikrokontroler ini dipilih karena memiliki kapasitas pemrosesan yang tinggi, mendukung berbagai protokol komunikasi, serta efisiensi daya yang baik. Dengan dukungan UART, SPI, dan I²C, Mikrokontroler mampu mengintegrasikan *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* dalam satu sistem dengan komunikasi yang stabil dan terorganisir. Selain itu, mikrokontroler ini memiliki kapasitas RAM sebesar 8 MB dan Flash Storage 16 MB, sehingga mampu menyimpan serta menjalankan algoritma *sensing* dengan stabil tanpa kendala memori [7]. Dengan spesifikasi tersebut, Mikrokontroler mampu untuk mendukung sistem pemantauan berbasis IoT yang membutuhkan ketepatan, kestabilan, dan efisiensi pemrosesan data secara *real-time*.



Gambar 2.3 Chip STM32 Mikrokontroler

[Sumber: STM32F405RGT6, STMicroelectronics, 2025,
<https://sg.element14.com/>]

Tabel 2.2 Spesifikasi Mikrokontroler

No	Spesifikasi	Detail
1	Prosesor	STM32H747 (Dual-Core: Cortex® M7 @ 480 MHz, Cortex® M4 @ 240 MHz)
2	Memori	2 MB Flash, 1 MB RAM
3	Antarmuka Komunikasi	UART, I2C, SPI
4	Kegunaan	Aplikasi industri, IoT, dan sistem pemantauan
5	Keunggulan	Kinerja tinggi, efisiensi energi, fleksibilitas tinggi

Sumber: STM32F405RGT6, STMicroelectronics, 2025, <https://sg.element14.com/>

Pada Tabel 2.2 menunjukkan spesifikasi dari mikrokontroler, dengan spesifikasi tersebut, mikrokontroler mampu menjalankan program *sensing* dari sensor *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* secara efisien. Kemampuannya untuk melakukan pemrosesan data secara *real-time*.

2.5. Perancangan PCB

2.5.1. PCB pada sistem IoT

Printed Circuit Board (PCB) adalah papan sirkuit yang digunakan untuk menghubungkan berbagai komponen elektronik melalui jalur konduktor yang dicetak pada permukaannya. PCB berfungsi sebagai rangka utama dalam sistem elektronik, menggantikan penggunaan rangkaian kabel konvensional yang lebih kompleks dan rentan terhadap kesalahan koneksi.

Keunggulan penggunaan PCB dalam sistem pemantauan berbasis IoT meliputi:

- 1) Integrasi yang lebih baik, karena semua komponen dapat dihubungkan dalam satu papan sirkuit
- 2) Stabilitas sistem yang lebih tinggi, karena koneksi antar komponen lebih kokoh dibandingkan dengan kabel konvensional.
- 3) Efisiensi desain, dengan tata letak komponen yang lebih ringkas dan terstruktur.

Dengan mempertimbangkan faktor-faktor ini, penelitian ini mengembangkan PCB untuk mengintegrasikan mikrokontroler, sensor, modul komunikasi, dan sistem distribusi daya dalam satu unit yang lebih kompak dan efisien.

2.5.2. Justifikasi Perancangan PCB dalam Penelitian Ini

Perancangan PCB dalam penelitian ini dilakukan sebagai bagian dari optimasi perangkat keras, dengan beberapa alasan utama sebagai berikut:

- 1) Efisiensi Integrasi Sistem
 - a) Menyatukan mikrokontroler, sensor, dan modul komunikasi dalam satu papan sirkuit untuk mengurangi kompleksitas koneksi eksternal.
 - b) Mengoptimalkan tata letak komponen agar lebih ringkas dan mudah dikelola.
- 2) Distribusi Daya yang Stabil
 - a) Menggunakan *Battery Eliminator Circuit* (BEC) untuk mendistribusikan tegangan dengan lebih efisien.
 - b) Mengurangi penggunaan *buck converter* individual, sehingga desain lebih sederhana dan lebih sedikit potensi kegagalan daya.
- 3) Optimasi Komunikasi Data
 - a) Memanfaatkan komunikasi serial internal mikrokontroler untuk memastikan pengiriman data secara langsung dengan latensi rendah dan *Jitter* minimal.
 - b) Menerapkan komunikasi TCP/IP bawaan dari mikrokontroler untuk skenario multi-node, dengan pertimbangan fleksibilitas integrasi jaringan dan dukungan protokol standar.

Dengan adanya optimasi ini, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat beroperasi lebih stabil, efisien, dan memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap gangguan eksternal.

2.5.3. Perancangan PCB Menggunakan EasyEDA

Dalam penelitian ini, perancangan PCB dilakukan menggunakan perangkat lunak EasyEDA. EasyEDA adalah *software* berbasis *cloud* yang memungkinkan perancangan skema elektronik, tata letak PCB, serta simulasi rangkaian dalam satu platform yang terintegrasi.[8]

Pemilihan EasyEDA sebagai perangkat lunak utama dalam desain PCB didasarkan pada beberapa keunggulan berikut:

- 1) Antarmuka yang intuitif, memungkinkan perancangan skema dan tata letak PCB dengan mudah.
- 2) Dukungan terhadap berbagai jenis komponen elektronik, termasuk mikrokontroler, sensor, dan modul komunikasi yang digunakan dalam penelitian ini.
- 3) Kemampuan simulasi rangkaian elektronik, sehingga desain PCB dapat diuji sebelum diproduksi untuk memastikan kestabilan dan kinerjanya.
- 4) Integrasi dengan layanan manufaktur PCB, sehingga desain yang dibuat dapat langsung diproduksi tanpa perlu konversi format tambahan.

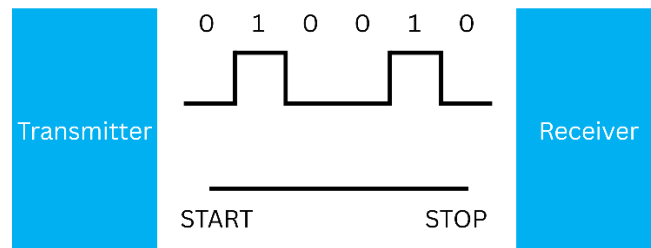
2.6. Optimasi Komunikasi dalam Sistem Data C-FLUX

2.6.1. Komunikasi Serial

Komunikasi serial adalah metode transmisi data digital di mana informasi dikirim secara berurutan, satu bit pada satu waktu, melalui satu jalur komunikasi. Berbeda dengan komunikasi paralel yang menggunakan beberapa jalur data secara bersamaan, komunikasi serial lebih hemat pin dan kabel, serta lebih stabil untuk jarak jauh, sehingga lebih umum digunakan dalam sistem tertanam (*embedded system*), mikrokontroler, dan perangkat IoT.

Salah satu bentuk paling umum dari komunikasi serial adalah UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). UART bekerja secara asinkron, artinya tidak memerlukan sinyal clock terpisah, melainkan mengandalkan kesepakatan baud rate

antara pengirim dan penerima untuk menyinkronkan kecepatan komunikasi. Dalam komunikasi UART, data dikirim dalam format bingkai (frame) yang terdiri dari bit start, bit data, bit parity (opsional), dan bit stop. Format ini memungkinkan pengiriman data yang andal antara dua perangkat meskipun hanya menggunakan dua jalur, yaitu TX (transmit) dan RX (receive) [9].



Gambar 2.4 Komunikasi Serial

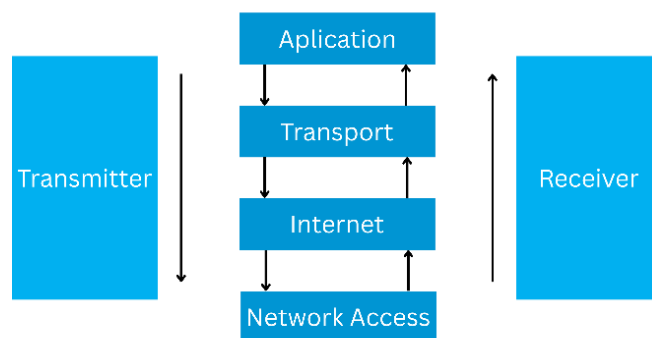
Gambar 2.4 menunjukkan ilustrasi prinsip komunikasi serial asinkron antara perangkat pemancar (*transmitter*) dan penerima (*receiver*), seperti yang digunakan dalam komunikasi UART atau USB CDC pada sistem embedded. Data dikirimkan secara berurutan bit demi bit, dimulai dari bit start, diikuti oleh rangkaian bit data (dari Most Significant Bit hingga Least Significant Bit), dan diakhiri oleh bit stop. Tidak seperti komunikasi sinkron yang membutuhkan sinyal clock terpisah, komunikasi serial asinkron tidak memerlukan sinyal sinkronisasi eksternal; sinkronisasi dilakukan berdasarkan kesepakatan baud rate antara kedua perangkat. Format ini memungkinkan pengiriman data yang efisien dengan jumlah jalur komunikasi minimal, serta umum digunakan dalam mikrokontroler untuk transmisi data *real-time* ke mikrokomputer melalui antarmuka USB.

2.6.2. Komunikasi *TCP/IP*

Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) merupakan protokol komunikasi standar dalam jaringan komputer yang digunakan secara luas pada berbagai sistem, termasuk perangkat embedded dan Internet of Things (IoT). TCP/IP terdiri dari serangkaian protokol berlapis yang memungkinkan perangkat untuk saling bertukar data secara andal melalui jaringan, baik jaringan lokal (LAN)

maupun internet. Salah satu keunggulan utama dari TCP/IP adalah kemampuannya untuk menjamin bahwa data dikirim secara berurutan, tidak duplikatif, dan sampai ke tujuan tanpa kehilangan informasi, melalui proses penomoran paket dan pengiriman ulang secara otomatis bila terjadi gangguan [10].

Mikrokontroler mendukung komunikasi berbasis TCP/IP secara native, melalui port Ethernet internal tanpa memerlukan modul tambahan. Fitur ini memungkinkan mikrokontroler untuk terhubung langsung dengan jaringan komputer dan bertindak sebagai klien atau server yang dapat mengirim atau menerima data sensor menggunakan soket TCP. Kemampuan ini membuat TCP/IP menjadi opsi yang relevan dalam sistem yang membutuhkan skalabilitas, koneksi multi-perangkat, atau akses dari jarak jauh.



Gambar 2.5 Komunikasi TCP/IP

Gambar 2.5 menggambarkan proses komunikasi satu arah dalam model TCP/IP yang terdiri dari empat lapisan utama: Application, Transport, Internet, dan Network Access. Data dari perangkat pengirim (Transmitter) mulai diproses di lapisan Application, lalu dibungkus menjadi segmen oleh lapisan Transport, selanjutnya diberi alamat jaringan oleh lapisan Internet, dan akhirnya dikirimkan secara fisik melalui lapisan Network Access. Setelah data melewati media transmisi, perangkat penerima (Receiver) akan membongkar informasi tersebut secara berurutan dari bawah ke atas, mulai dari Network Access hingga Application.

2.7. Optimasi distribusi daya pada system C-FLUX

2.7.1. Penggunaan Battery Eliminator Circuit

Dalam sistem pemantauan emisi karbon, efisiensi distribusi daya sangat penting untuk memastikan perangkat dapat beroperasi secara optimal dengan desain yang ringkas dan andal. Sebelumnya, distribusi daya menggunakan metode satu sensor satu *buck converter*, di mana setiap sensor memiliki regulator daya sendiri untuk menyesuaikan tegangan sesuai kebutuhan masing-masing komponen. Namun, metode ini dinilai kurang efisien karena menambah jumlah komponen yang digunakan dan memperumit tata letak sistem. Untuk mengatasi permasalahan ini, sistem baru menggunakan *Battery Eliminator Circuit* (BEC) sebagai solusi distribusi daya yang lebih sederhana dan efisien.

2.7.2. Prinsip Kerja Battery Eliminator Circuit (BEC)

Battery Eliminator Circuit (BEC) adalah sistem regulator daya yang digunakan untuk menyalurkan tegangan dari satu sumber utama ke berbagai perangkat dengan kebutuhan tegangan yang berbeda. Dalam penelitian ini, BEC menggantikan metode satu sensor satu buck converter dengan cara membagi daya dari satu regulator utama ke beberapa sensor secara lebih optimal.

BEC bekerja dengan cara menyesuaikan tegangan keluaran dari sumber daya utama ke level yang dibutuhkan oleh setiap sensor tanpa memerlukan regulator daya terpisah untuk setiap komponen. Dengan cara ini, sistem dapat mengurangi jumlah komponen regulator daya sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan daya dalam perangkat. Selain itu, penggunaan BEC juga menyederhanakan desain rangkaian dan meminimalkan potensi kerusakan akibat penumpukan panas pada beberapa titik regulator. Pendekatan ini juga membantu memudahkan proses pemeliharaan dan troubleshooting karena distribusi daya menjadi lebih terpusat dan tertata.

2.7.3. Manfaat BEC dalam Distribusi Daya yang Lebih Stabil

Penggunaan BEC dalam sistem ini memberikan beberapa keuntungan utama dibandingkan metode distribusi daya sebelumnya

- 1) Mengurangi jumlah komponen regulator daya karena hanya satu regulator utama yang digunakan untuk membagi tegangan ke semua sensor, sehingga desain PCB lebih ringkas dan sederhana
- 2) Meningkatkan efisiensi energi dengan mengurangi jumlah konversi daya yang diperlukan dibandingkan metode *buck converter* per sensor yang sebelumnya digunakan
- 3) Mempermudah integrasi sistem dengan mengurangi kompleksitas jalur daya di PCB, sehingga perancangan dan pemeliharaan perangkat menjadi lebih mudah
- 4) Tetap memberikan perlindungan sensor dari lonjakan tegangan dengan menggunakan BEC yang memiliki sistem pembatas tegangan bawaan, yang dapat menghindari overvoltage yang berpotensi merusak sensor

2.7.4. Perbandingan dengan Metode Distribusi Daya Sebelumnya

Tabel 2.3 Perbandingan Distribusi Daya antara *Buck Converter* dan BEC

No	Aspek	Metode Sebelumnya (Buck Converter per Sensor)	Metode Baru (<i>Battery Eliminator Circuit</i>)
1	Jumlah Regulator Daya	Setiap sensor memiliki regulator daya sendiri, menyebabkan jumlah regulator lebih banyak	Menggunakan satu regulator utama dan BEC untuk membagi daya ke semua sensor
2	Efisiensi Distribusi Daya	Kurang efisien karena setiap sensor memiliki regulator sendiri yang meningkatkan konsumsi daya	Lebih efisien karena daya didistribusikan langsung dari regulator utama tanpa konversi tambahan
3	Kompleksitas PCB	Lebih kompleks karena membutuhkan banyak regulator dan jalur distribusi daya yang lebih rumit	Lebih sederhana karena jumlah regulator daya berkurang dan jalur distribusi lebih terorganisir
4	Perlindungan Sensor	Setiap sensor memiliki proteksi individual, tetapi jumlah komponen meningkat	Tetap memberikan perlindungan terhadap overvoltage dengan stabilisasi tegangan

Dari perbandingan tabel 2.4 dapat disimpulkan bahwa penggunaan BEC dalam sistem distribusi daya memberikan keuntungan signifikan dalam hal efisiensi energi, kesederhanaan desain, dan kemudahan perawatan. Meskipun metode lama dengan satu *buck converter* per sensor memiliki keunggulan dalam proteksi individual, penggunaan BEC tetap dapat memberikan perlindungan terhadap overvoltage sambil mengurangi jumlah komponen yang digunakan. Dengan demikian, implementasi BEC menjadi pilihan yang lebih optimal dalam sistem pemantauan emisi karbon ini.

2.8. Optimasi Pengolahan Data dengan Komputasi Edge

2.8.1. Komputasi Edge

Komputasi edge merujuk pada pendekatan pemrosesan data yang dilakukan dekat dengan sumber data itu sendiri, seperti di mikrokomputer atau perangkat keras lokal, alih-alih mengirimkan data ke pusat data atau cloud untuk diproses. Pendekatan ini memungkinkan pemrosesan *real-time* dan pengurangan latensi dalam sistem pemantauan berbasis IoT, karena data dapat langsung diproses dan dianalisis di lokasi perangkat tanpa tergantung pada koneksi internet atau pusat data yang jauh [11].

Dalam sistem C-FLUX, komputasi edge diterapkan untuk mengoptimalkan pengolahan data yang dihasilkan oleh *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer*. Proses ini memungkinkan sistem untuk melakukan *pre-processing* data secara otomatis di mikrokomputer, seperti membersihkan data, melakukan interpolasi terhadap missing value, serta mengoptimalkan data untuk analisis lebih lanjut. Penggunaan komputasi edge juga mengurangi beban pada jaringan, karena hanya data yang relevan dan telah diproses yang dikirim ke server atau cloud untuk penyimpanan dan analisis lanjutan. Dengan teknik ini, efisiensi sistem dapat ditingkatkan, latensi pengolahan data dapat dikurangi, dan keterbatasan bandwidth dapat diminimalkan.

2.8.2. Penggunaan Mikrokomputer

Mikrokomputer adalah perangkat yang memiliki kemampuan pemrosesan data dan pengendalian yang terintegrasi dalam satu sistem kompak dan efisien. Dengan spesifikasi yang cukup untuk menangani berbagai aplikasi, mikrokomputer dilengkapi dengan prosesor, memori, serta berbagai antarmuka komunikasi yang mendukung pengolahan data secara lokal (*edge computing*). Keunggulan mikrokomputer terletak pada konsumsi daya yang rendah dan kemampuannya untuk menjalankan aplikasi yang kompleks dengan sumber daya terbatas, menjadikannya pilihan yang tepat untuk berbagai aplikasi IoT [12].

Dalam penelitian ini, mikrokomputer digunakan untuk menangani proses pengolahan data yang diterima dari sensor-sensor dalam sistem C-FLUX. Mikrokomputer bertanggung jawab untuk menjalankan *pre-processing* data, seperti pembersihan data, interpolasi missing value, dan sampling, serta memastikan pengolahan data secara *real-time*. Dengan kemampuan untuk memproses data secara lokal, mikrokomputer membantu mengurangi latensi dan ketergantungan pada server atau cloud, memastikan sistem dapat berfungsi secara lebih efisien dan responsif.

2.8.3. Spesifikasi Mikrokomputer

Mikrokomputer yang digunakan pada sistem ini merupakan perangkat berdaya rendah dengan kapasitas pemrosesan yang memadai untuk menjalankan tugas komputasi ringan hingga menengah. Pemilihan perangkat ini dalam penelitian didasarkan pada kemampuannya dalam melakukan *pre-processing* data secara *real-time* dengan konsumsi daya yang efisien. Selain itu, mikrokomputer ini juga mendukung komunikasi serial, yang diperlukan untuk menerima data dari Gas Analyzer dan 3D Anemometer [13].

Tabel 2.4 Spesifikasi Mikrokomputer

No	Spesifikasi	Detail
1	CPU	Quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 1.5GHz
2	RAM	8GB LPDDR4
3	Storage	Mikro SD 32GB
4	Konektivitas	1x Gigabit <i>Ethernet</i> , 2x USB 3.0, 2x USB 2.0
5	Sistem Operasi	OS (Linux)
6	Port GPIO	Bisa digunakan untuk koneksi sensor tambahan
7	Daya	5V/3A USB-C

Tabel 2.5 menunjukkan spesifikasi perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini, yang berfungsi sebagai mikrokomputer untuk menangani *pre-processing* data dan manajemen komunikasi sistem. Perangkat ini dilengkapi dengan prosesor quad-core Cortex-A72 (ARM v8) dengan kecepatan 1.5GHz, yang memberikan performa komputasi cukup tinggi untuk menjalankan berbagai tugas pemrosesan data secara efisien. Dengan kapasitas RAM sebesar 4GB LPDDR4, perangkat ini mampu menangani eksekusi skrip dan menyimpan data sementara dengan stabil. Penyimpanan data dilakukan menggunakan SSD berkapasitas 1TB yang terhubung melalui USB 3.0, memungkinkan akses data yang lebih cepat dibandingkan dengan media penyimpanan berbasis kartu SD.

Dari segi konektivitas, Mikrokomputer yang digunakan mendukung Gigabit *Ethernet* yang digunakan untuk komunikasi jaringan berbasis TCP/IP. Selain itu, tersedia dua port USB 3.0 dan dua port USB 2.0 yang digunakan untuk komunikasi serial. Sistem operasi yang digunakan adalah OS berbasis Linux, yang mendukung berbagai pustaka dan aplikasi yang dibutuhkan dalam penelitian ini. Perangkat ini juga memiliki port GPIO yang dapat digunakan untuk menghubungkan sensor tambahan jika diperlukan.

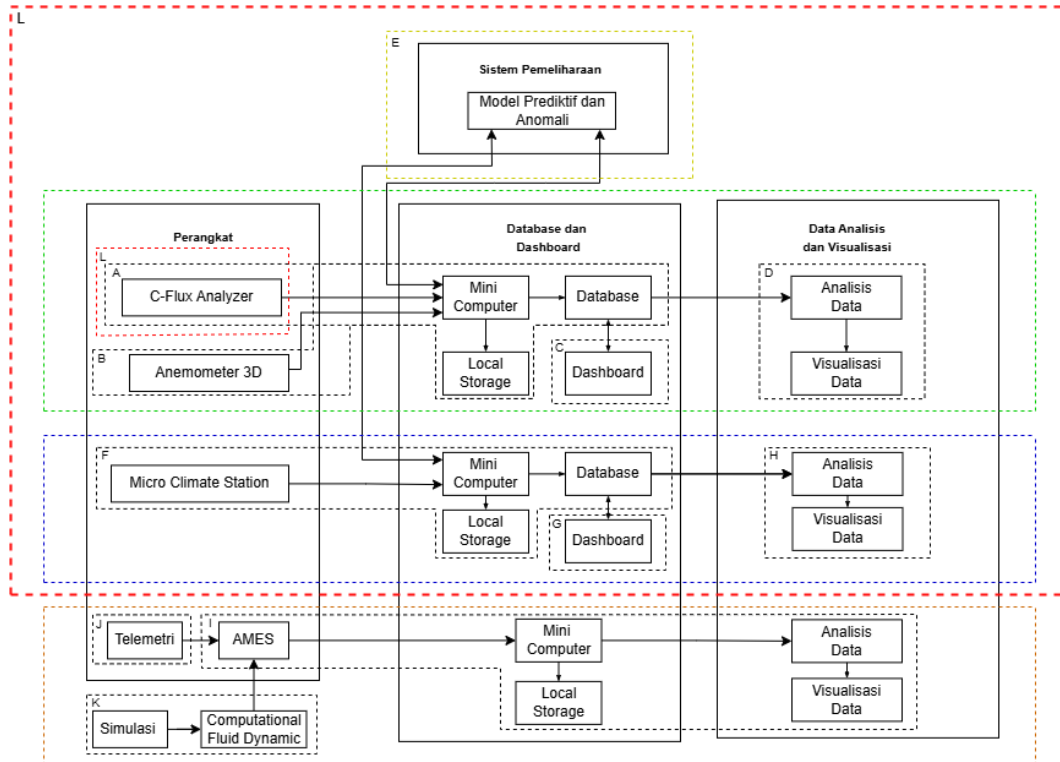
BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari 2025 hingga bulan Juni 2025 di Laboratorium Telekomunikasi, Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

3.2. Capstone Project

Capstone project pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Capstone Project Eddy Covariance Station (ECS)

Penelitian ini merupakan bagian dari *Capstone Project* dalam pengembangan sistem Eddy Covariance Station (ECS) yang bertujuan mengintegrasikan berbagai komponen untuk pengukuran fluks karbon secara *real-time*. Berdasarkan Gambar 3.1, proyek ECS terdiri atas beberapa sub-proyek yang saling terhubung, masing-masing berfokus pada pengembangan sistem tertentu. Proyek C-Flux Analyzer (Bagian A) berfokus pada perancangan perangkat keras serta pemrosesan data menggunakan mikrokomputer. Proyek Anemometer 3D (Bagian B) dikembangkan untuk mengukur kecepatan angin tiga dimensi, sedangkan Dashboard Visualisasi Data (Bagian C) dirancang untuk menampilkan data secara *real-time*.

Proyek Pencocokan Data ECS dengan Li-Cor (Bagian D) dilakukan untuk keperluan validasi perangkat, dan Model Prediktif Deteksi Anomali (Bagian E) dikembangkan untuk pemeliharaan sistem berbasis prediksi. Selain itu, Microclimate Station (Bagian F) mencakup pengukuran suhu, kelembapan, tekanan udara, dan curah hujan, dengan dukungan dari sistem dashboard (Bagian G) dan analisis data untuk deteksi anomali (Bagian H). Proyek Aerial Measurement Eddy Covariance System (AMES) (Bagian I) dikembangkan untuk pengukuran fluks karbon berbasis drone, sedangkan Sistem Telemetri (Bagian J) memastikan kestabilan transmisi data. Untuk mendukung validasi atmosferik, dilakukan pula simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) (Bagian K) guna memodelkan turbulensi udara yang memengaruhi pengukuran drone.

Penelitian ini secara khusus berfokus pada sistem integrator perangkat *C-Flux Analyzer*, Anemometer 3D, dan *Microclimate Station* (Bagian L). Sistem ini dirancang untuk memahami korelasi data emisi karbon dengan faktor lingkungan, sehingga memungkinkan analisis yang lebih mendalam terkait hubungan antara emisi gas rumah kaca dan parameter lingkungan. Selain itu, penelitian ini membahas mengenai optimasi sistem C-Flux Analyzer dari segi komunikasi, manajemen daya, dan pengelolaan data. 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.

3.3. Alat dan Bahan

3.3.1. Perangkat keras

Perangkat keras dalam sistem C-FLUX Analyzer terdiri dari beberapa komponen utama yang berfungsi untuk mendeteksi, mengukur, dan mengirimkan data yang berkaitan dengan emisi karbon dan kondisi atmosfer. Komponen utama yang digunakan adalah *Gas Analyzer*, yang terdiri dari sensor-sensor untuk mengukur konsentrasi CO₂, CH₄, H₂O, suhu udara, kelembapan, dan tekanan udara, serta *3D Anemometer* untuk mengukur kecepatan dan arah angin.

Perangkat keras pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Perangkat keras penelitian

No	Komponen	Fungsi
1	Mikrokontroler	Mikrokontroler utama untuk membaca dan mengolah data dari sensor.
2	Sensor CO ₂	Sensor CO ₂ untuk mendeteksi kadar karbon dioksida di udara.
3	Sensor CH ₄	Sensor CH ₄ untuk mengukur konsentrasi gas metana.
4	Sensor tekanan	Sensor tekanan udara untuk mengukur perubahan tekanan atmosfer.
5	Sensor suhu	Sensor suhu dan kelembapan udara.
6	<i>3D Anemometer</i>	Sensor untuk mengukur kecepatan dan arah angin dalam tiga dimensi.
7	Switch D-Link	Menghubungkan beberapa perangkat dalam satu jaringan lokal.
8	Router Tenda	Menghubungkan system ke jaringan internet untuk pengiriman data ke <i>cloud</i> .
9	Mikrokomputer	Pusat pemrosesan data dan penyimpanan sementara sebelum dikirim ke <i>database</i> utama.
10	MicroSD 32GB	Media penyimpanan data hasil pengukuran sebelum dikirim ke <i>cloud</i> .
11	PCB	Papan sirkuit yang menggantikan breakout board untuk meningkatkan efisiensi integrasi perangkat.
12	<i>Battery Eliminator Circuit (BEC)</i>	Komponen untuk mengoptimalkan distribusi daya dan Melindungi komponen

3.3.2. Perangkat lunak

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk mengelola dan mengontrol perangkat keras, memproses data yang diterima, serta memastikan komunikasi yang efisien antara komponen sistem. Pemrograman dilakukan menggunakan bahasa Python untuk menangani pengolahan data di mikrokomputer, serta untuk berinteraksi dengan sensor-sensor yang terhubung. Komunikasi data antar perangkat, seperti *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer*, diatur menggunakan komunikasi serial untuk memastikan pengiriman data yang stabil. Selain itu, sistem *pre-processing* data di mikrokomputer dilakukan dengan memanfaatkan berbagai pustaka Python untuk pembersihan data, interpolasi, dan sampling data yang diperlukan sebelum disimpan dalam basis data.

Perangkat lunak pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.3 sebagai berikut:

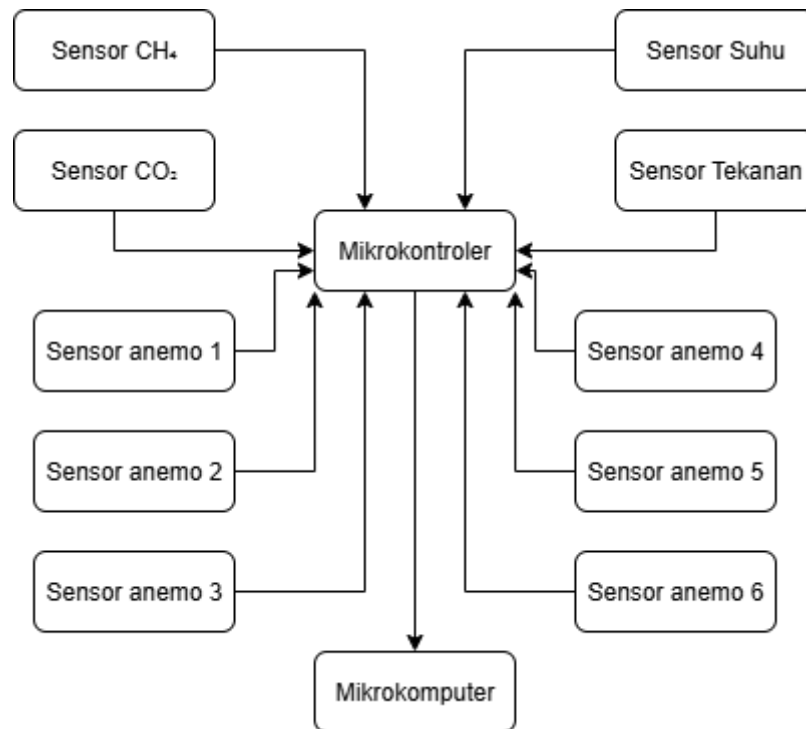
Tabel 3.2 Perangkat lunak penelitian

No	Perangkat Lunak	Fungsi
1	<i>Arduino IDE</i>	Pemrograman dan <i>debugging</i> kode untuk Mikrokontroler
2	<i>Python</i>	Digunakan untuk menjalankan skrip <i>pre-processing</i> data (<i>cleaning</i> , <i>outlier detection</i> , <i>sampling</i>).
3	htop / top command	Monitoring penggunaan CPU dan RAM pada mikrokomputer selama <i>pre-processing</i> .
4	vcgencmd	Memantau suhu mikrokomputer selama proses <i>pre-processing</i> .

3.4. Perancangan Sistem

3.4.1. Blok Diagram Sistem

Blok diagram sistem pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2 sebagai berikut:



Gambar 3.2 Blok Diagram sistem C-FLUX Analyzer

Gambar 3.2 merupakan diagram sistem C-FLUX Analyzer yang menggambarkan komponen-komponen utama dalam sistem pemantauan fluks karbon berbasis sensor. Sistem ini terdiri dari berbagai jenis sensor seperti sensor CH₄, sensor CO₂, sensor suhu, sensor tekanan dan sensor *3D Anemometer* yang ditempatkan pada papan PCB. Semua sensor ini terhubung ke mikrokontroler yang bertugas untuk mengolah data yang diterima dan mengirimkannya untuk pemrosesan lebih lanjut. Selain mikrokontroler, sistem ini juga melibatkan mikrokomputer yang menjalankan aplikasi untuk komputasi edge, mengolah data lebih lanjut, dan memberikan hasil analisis secara *real-time*. Akuisisi data dilakukan secara terus-menerus untuk pemantauan kondisi lingkungan, sedangkan komputasi edge memungkinkan pengolahan data secara lokal sebelum dikirim ke server atau platform lain untuk analisis lebih lanjut. Sistem ini dirancang untuk mengoptimalkan pemantauan fluks gas di lingkungan dengan memanfaatkan teknologi sensor dan komputasi terdistribusi.

3.4.2. Metode Integrasi *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer*

Penelitian ini mengintegrasikan *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* dalam satu sistem. Integrasi ini dilakukan untuk menyederhanakan sistem, meningkatkan efisiensi perangkat, serta mempermudah pengelolaan dan pemeliharaan. Sebelumnya, kedua perangkat ini menggunakan mikrokontroler yang terpisah, yang menyebabkan komunikasi data yang berbeda dan sistem yang lebih kompleks. Pada sistem ini, Mikrokontroler bertugas untuk membaca data dari semua sensor secara bersamaan dengan kecepatan 7 data per detik. Data yang diperoleh dari sensor dikirim ke mikrokomputer melalui komunikasi serial.

Tabel 3.3 Jenis Sensor dan Metode Komunikasi dengan mikrokontroler

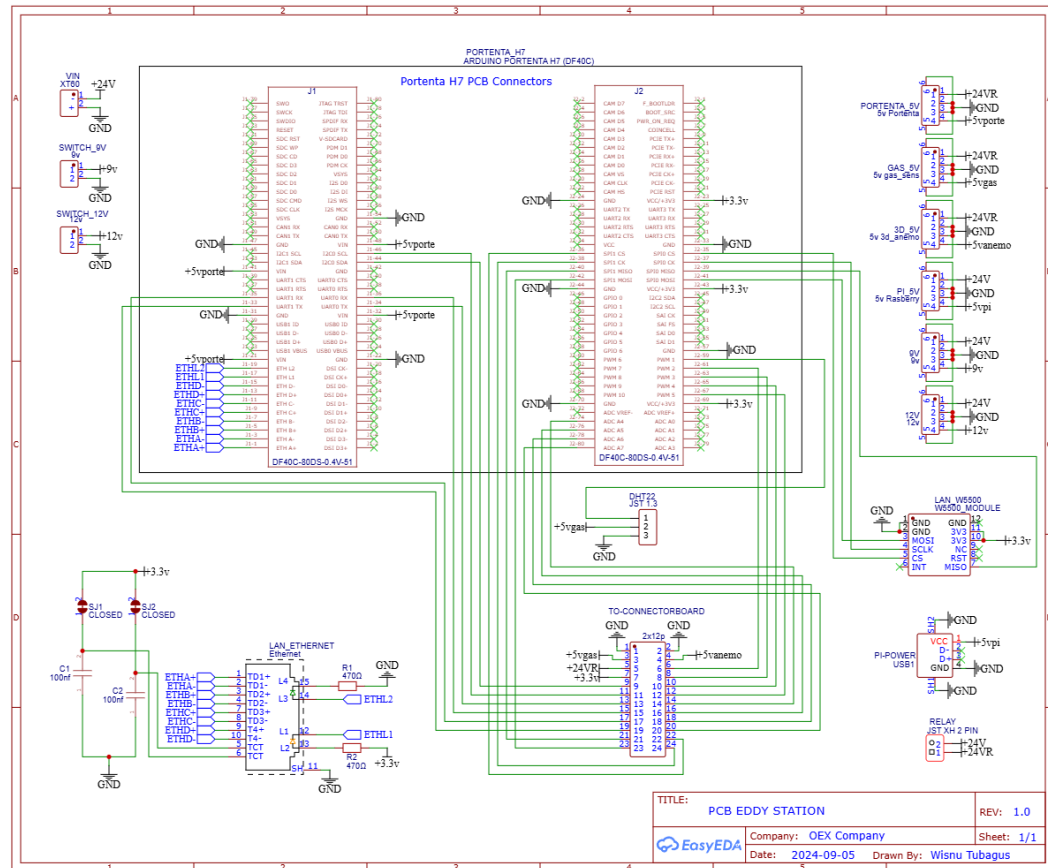
No	Sensor	Metode Komunikasi
1	Sensor CO ₂	UART (RX/TX)
2	Sensor CH ₄	UART (RX/TX)
3	Sensor Tekanan Udara	I ² C
4	Sensor Suhu & Kelembapan	I ² C
5	Sensor Suhu & Kelembapan	Digital (1-Wire)
6	Kecepatan dan Arah Angin	Digital

Pada sistem ini, sensor CO₂ dan CH₄ menggunakan komunikasi UART (RX/TX) dengan baud rate yang telah dikonfigurasi untuk memastikan komunikasi berjalan tanpa konflik. Sensor tekanan udara dan suhu-kelembapan menggunakan komunikasi I²C, yang memungkinkan beberapa perangkat berbagi jalur yang sama dengan alamat unik. Sensor suhu memanfaatkan komunikasi digital berbasis 1-Wire, sedangkan *3D Anemometer* dengan sensor ultrasonik menggunakan sinyal digital untuk membaca waktu tempuh gelombang ultrasonik dan menentukan kecepatan serta arah angin. Agar seluruh sensor dapat bekerja secara simultan, sistem dijadwalkan untuk mengambil data setiap 143 milidetik menggunakan fungsi (millis()) pada Arduino. Dengan interval ini, sistem mampu melakukan 7 siklus *sensing* dalam satu detik, memastikan bahwa spesifikasi 7 data per detik terpenuhi.

3.5. Perancangan PCB

3.5.1. Diagram skematik PCB

Skematik PCB pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.3 sebagai berikut:



Gambar 3.3 Skematik PCB C-FLUX Analyzer

Pada gambar 3.3 Skematik PCB dirancang untuk mengintegrasikan seluruh komponen utama dalam satu papan sirkuit guna meningkatkan efisiensi sistem, kestabilan daya, dan optimasi komunikasi data. PCB ini menghubungkan mikrokontroler, sensor, modul komunikasi, dan sistem distribusi daya dalam satu kesatuan yang lebih ringkas, sehingga mengurangi kompleksitas *wiring* dan meminimalkan potensi gangguan koneksi. *Battery Eliminator Circuit* (BEC) digunakan sebagai sumber distribusi daya utama untuk memastikan tegangan yang stabil bagi setiap komponen tanpa perlu menggunakan banyak regulator individual. Jalur sirkuit PCB dirancang dengan mempertimbangkan efisiensi tata letak komponen guna memaksimalkan ruang, mengurangi panjang jalur listrik yang tidak

perlu, serta meningkatkan kestabilan sinyal antar komponen. Dengan optimasi ini, sistem dapat beroperasi lebih stabil, efisien, dan memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap gangguan eksternal, sehingga mendukung pemantauan emisi karbon secara lebih akurat dan andal.

3.5.2. Implementasi *Battery Eliminator Circuit* dalam PCB

Battery Eliminator Circuit (BEC) digunakan dalam sistem ini untuk mengoptimalkan distribusi daya ke berbagai sensor dan komponen elektronik. Sebelumnya, sistem menggunakan *buck converter* terpisah untuk setiap sensor, yang menyebabkan penggunaan komponen yang berlebihan dan meningkatkan kompleksitas rangkaian. Dengan mengintegrasikan BEC ke dalam PCB, sistem distribusi daya menjadi lebih sederhana, efisien, dan stabil.

BEC berfungsi sebagai regulator daya yang mengambil sumber tegangan dari baterai atau suplai utama, lalu menurunkannya ke tegangan yang lebih rendah sesuai dengan kebutuhan sensor dan modul lainnya. Pada penelitian ini, BEC digunakan untuk menggantikan penggunaan beberapa *buck converter*, sehingga sistem hanya membutuhkan satu regulator utama untuk menyalurkan daya ke seluruh sensor melalui distribusi jalur yang lebih terorganisir dalam PCB.

Tegangan keluaran dari BEC disalurkan ke setiap komponen berdasarkan spesifikasi daya masing-masing sensor. Tabel 3.5 menunjukkan Distribusi Tegangan dari BEC ke Komponen Sistem merangkum bagaimana daya disalurkan ke berbagai perangkat.

Tabel 3.4 Distribusi Tegangan dari BEC ke Komponen Sistem

No	Komponen	Tegangan Operasional	Arus Maksimum
1	Mikrokontroler	5V	120 mA
3	CO ₂ Sensor	5V	85 mA
4	CH ₄ Sensor	5V	85 mA
5	Sensor Tekanan	5V	3,4 μ A
6	Sensor Suhu	5V	650 μ A

No	Komponen	Tegangan Operasional	Arus Maksimum
7	Sensor Suhu	5V	2,5 mA
8	3D Anemometer	5V	90mA
9	Mikrokomputer	5V	3A

Sumber: Datasheet Arduino, DFRobot, Winsen, Bosch Sensortec, Sensirion

Dengan desain ini, sistem tidak hanya menjadi lebih efisien dalam distribusi daya, tetapi juga lebih mudah dalam pemeliharaan dan perbaikan, karena sistem tidak lagi bergantung pada banyak *buck converter* individual yang berisiko mengalami kegagalan independen. Integrasi *Battery Eliminator Circuit* (BEC) dalam PCB memungkinkan sistem mendistribusikan daya dengan lebih stabil dan efisien, menggantikan sistem distribusi daya sebelumnya yang lebih kompleks. Dengan pendekatan ini, sistem dapat bekerja lebih andal dengan pengurangan jumlah regulator individual, sehingga meningkatkan efisiensi daya dan mengurangi kemungkinan gangguan pada sensor akibat fluktuasi tegangan.

3.6. Pre-processing Data

3.6.1. Metode Pembersihan Data

Pada penelitian ini, pembersihan data dilakukan untuk memastikan bahwa data yang diperoleh dari *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer* bebas dari nilai yang tidak valid sebelum dianalisis lebih lanjut. Proses ini mencakup penanganan *missing value*, deteksi *outlier*, dan penghapusan nilai duplikat. Data yang diperoleh dari sensor dapat mengalami berbagai permasalahan seperti nilai yang hilang (*missing value*), data yang berada di luar rentang normal (*outlier*), atau duplikasi data akibat kesalahan pencatatan. Oleh karena itu, sebelum data digunakan untuk proses lebih lanjut, dilakukan beberapa tahapan pembersihan berikut:

3.6.1.1. *Handling Missing Value*

Missing value terjadi ketika sensor gagal membaca atau mengirimkan data dalam siklus *sensing* tertentu. Penyebabnya bisa berasal dari gangguan komunikasi, sensor mengalami error sementara, atau noise pada sistem.

Metode yang digunakan untuk menangani *missing value* dalam penelitian ini adalah:

- 1) Menandai *missing value* sebagai NaN (*Not a Number*) Semua nilai yang tidak terbaca atau bernilai nol dalam sistem akan dikategorikan sebagai NaN agar dapat dikenali dalam proses pembersihan.
- 2) interpolasi untuk mengisi *missing value* Jika nilai hilang tidak terlalu banyak, interpolasi linear digunakan untuk mengisi nilai yang hilang berdasarkan tren data sebelum dan sesudahnya.

3.6.1.2. *Deteksi Outlier Menggunakan Interquartile Range (IQR)*

Dalam penelitian ini, untuk mendeteksi adanya outlier pada data yang diperoleh dari *Gas Analyzer* dan *3D Anemometer*, digunakan metode *Interquartile Range* (IQR). Metode ini merupakan salah satu teknik statistik yang efektif untuk mengidentifikasi nilai-nilai yang tidak sesuai atau jauh dari pola umum data. IQR bekerja dengan membagi data menjadi empat bagian yang memiliki jumlah elemen yang hampir sama, yang disebut sebagai kuartil. Proses ini dimulai dengan menghitung Q1 (kuartil pertama) dan Q3 (kuartil ketiga), yang masing-masing mewakili batas 25% data pertama dan 75% data pertama dalam dataset.

Setelah mendapatkan nilai Q1 dan Q3, langkah berikutnya adalah menghitung rentang interkuartil (IQR), yaitu selisih antara Q3 dan Q1. Dengan rentang ini, kita dapat menentukan batas bawah dan batas atas untuk data yang dianggap wajar atau normal. Batas bawah ditentukan dengan mengurangi nilai Q1 dikurangi 1,5 kali IQR, sementara batas atas ditentukan dengan menambah nilai Q3 ditambah 1,5 kali IQR. Data yang terletak di luar batas bawah dan batas atas ini dianggap sebagai outlier karena mereka jauh dari distribusi data utama.

3.6.1.3. Penghapusan Nilai Duplikat

Proses penghapusan nilai duplikat dimulai dengan identifikasi timestamp yang terkait dengan setiap data. Setiap data yang diperoleh dari sensor memiliki timestamp yang menunjukkan waktu pengukuran. Setelah timestamp teridentifikasi, langkah berikutnya adalah memeriksa nilai yang terhubung dengan timestamp tersebut. Jika terdapat data yang memiliki nilai yang sama persis dengan timestamp yang sama, maka data tersebut dianggap sebagai anomali, karena pengulangan data yang sama dalam satu periode pengukuran tidak diinginkan dalam sistem.

Data yang teridentifikasi sebagai duplikat ini kemudian diubah menjadi *missing value* (NaN) untuk menandakan bahwa nilai tersebut tidak valid dan perlu diproses lebih lanjut. Proses ini penting untuk menjaga integritas data yang digunakan dalam analisis, mengurangi potensi bias yang ditimbulkan oleh pengulangan data yang tidak sesuai, serta memastikan hanya data yang benar-benar representatif yang digunakan dalam pemrosesan lebih lanjut.

3.6.2. Metode Sampling Data

Sampling data merupakan langkah penting dalam tahap *pre-processing* untuk mengurangi jumlah data tanpa menghilangkan informasi utama. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah global mode sampling. Metode ini bekerja dengan menghitung modus dari seluruh data dalam rentang waktu 24 jam secara langsung, tanpa membaginya ke dalam interval waktu yang lebih kecil. Prosesnya meliputi tahapan berikut:

- 1) Seluruh data selama periode 24 jam diproses secara sekaligus dalam satu tahap.
- 2) Modus dihitung dari keseluruhan dataset tersebut, tanpa segmentasi waktu.
- 3) Hasil akhir berupa satu nilai modus yang mewakili distribusi data secara keseluruhan.

Keunggulan dari metode ini adalah kemampuannya dalam mempertahankan distribusi data global tanpa dipengaruhi oleh fluktuasi jangka pendek. Namun, metode ini juga memiliki kekurangan, yaitu kebutuhan sumber daya pemrosesan yang lebih besar dalam satu kali eksekusi dibandingkan dengan metode sampling bertahap.

3.7. Metode Pengujian dan Evaluasi Sistem

3.7.1. Evaluasi Kinerja mikrokontroler dalam Proses *Sensing*

3.7.1.1. Evaluasi Pengiriman Data mikrokontroler

Evaluasi dilakukan untuk memastikan bahwa mikrokontroler mampu menangani proses *sensing* dari semua sensor secara bersamaan dengan kecepatan 7 data per detik. Pengujian ini mencakup analisis *Sensing time interval* dan *Jitter Sensing*, yang dilakukan dengan cara menganalisis waktu millis yang diberikan kepada mikrokontroler sesaat setelah proses akuisisi data. Untuk analisisnya, digunakan program otomatis berbasis Python.

Mikrokontroler mengontrol dan membaca data dari beberapa sensor yang menggunakan komunikasi UART, I²C, dan Digital secara simultan. Sistem *sensing* ini berjalan dengan interval 143 ms per siklus, sehingga secara teoritis dapat mencapai 7 data per detik. Untuk memastikan bahwa mikrokontroler dapat membaca semua sensor dengan frekuensi 7 data per detik, dilakukan logging data menggunakan Arduino Serial Monitor. Langkah-langkah pengujian sebagai berikut:

- 1) Menjalankan sistem *sensing* selama periode tertentu.
- 2) Merekam jumlah total data yang diterima dalam waktu tersebut.
- 3) Menghitung jumlah rata-rata data per detik.
- 4) Menganalisis interval waktu antar data dan *Jitter* yang terdeteksi menggunakan program Python untuk pengolahan otomatis.

- 5) Membandingkan hasil dengan target spesifikasi yaitu 7 data per detik dan total data selama 7 hari sebanyak 2.116.800 data.

Jika hasil *sensing* lebih rendah dari 7 data per detik atau total data yang tercatat selama 7 hari kurang dari 2.116.800, kemungkinan ada delay dalam pembacaan sensor, pemrosesan yang terlalu berat, atau gangguan dalam komunikasi antar perangkat. Jika nilai *sensing* berada pada angka target 7 data per detik dan total data sesuai dengan target, maka sistem dianggap berfungsi dengan baik.

3.7.2. Evaluasi Komunikasi Data

Evaluasi komunikasi data dilakukan untuk menganalisis perubahan dalam metode pengiriman data antara mikrokontroler dan mikrokomputer. Sebelumnya, sistem menggunakan protokol komunikasi TCP/IP untuk mentransmisikan data antar perangkat. Namun, untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi kompleksitas, komunikasi data kini dialihkan ke penggunaan protokol komunikasi Serial.

Tujuan dari perubahan ini adalah untuk mengoptimalkan latensi dan *Data rate* dalam pengiriman data, dua faktor penting yang mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Latensi transmisi mengacu pada waktu yang dibutuhkan untuk mentransfer data dari mikrokontroler ke mikrokomputer, sementara *Data rate* menggambarkan jumlah data yang dapat dikirimkan dalam satu satuan waktu.

Dalam evaluasi ini, kami akan mengukur dua aspek utama:

- 1) Mengukur waktu yang diperlukan untuk setiap paket data untuk berpindah (*Latency*) dari mikrokontroler ke mikrokomputer menggunakan komunikasi Serial, dibandingkan dengan *latency* menggunakan protokol TCP/IP sebelumnya.
- 2) Mengukur kecepatan data yang dapat dikirimkan (*Data rate*) selama komunikasi Serial, dan membandingkannya dengan *Data rate* yang tercapai saat menggunakan TCP/IP.

Tujuan dari evaluasi ini adalah untuk memastikan bahwa komunikasi data yang dilakukan melalui port Serial tidak hanya mempertahankan kinerja yang setara dengan komunikasi TCP/IP, tetapi juga dapat memberikan pengurangan latensi dan optimasi *Data rate* untuk mendukung pengiriman data yang lebih cepat dan efisien. Dengan demikian, perubahan metode komunikasi ini diharapkan dapat mengoptimalkan kinerja sistem secara keseluruhan dan mempercepat respons dalam pemantauan dan pengolahan data sensor.

3.7.3. Evaluasi Konsumsi dan Efisiensi Distribusi Daya

Subbab ini menjelaskan metode yang digunakan untuk mengevaluasi konsumsi daya dan efisiensi distribusi daya dalam sistem yang dirancang. Evaluasi dilakukan dengan cara memantau daya masukan (Pin) dan daya keluaran (Pout) secara berkala dalam periode waktu tertentu. Data yang diperoleh akan mencerminkan seberapa besar daya yang diterima sistem dan seberapa besar daya yang berhasil didistribusikan ke beban. Pengambilan data dilakukan setiap jam untuk mendapatkan gambaran yang lebih detail mengenai dinamika konsumsi dan distribusi daya dalam satu hari penuh.

Perbandingan antara nilai Pin dan Pout akan digunakan untuk menghitung efisiensi distribusi daya. Nilai efisiensi ini akan diolah dan dianalisis lebih lanjut pada bab hasil untuk mengevaluasi performa sistem baik pada versi lama maupun versi baru. Dengan metode ini, dapat diidentifikasi seberapa efektif sistem dalam mendistribusikan daya dan apakah terdapat kehilangan daya yang signifikan selama proses distribusi. Evaluasi ini juga menjadi dasar penting dalam membandingkan efisiensi antara dua versi sistem untuk menentukan peningkatan kinerja yang terjadi.

3.7.4. Evaluasi Kinerja Mikrokomputer

Evaluasi ini bertujuan untuk mengukur performa mikrokomputer selama proses komputasi edge, guna memastikan bahwa sistem mampu menangani pemrosesan data secara efisien tanpa mengalami bottleneck atau penurunan kinerja yang

signifikan. Pengujian dilakukan dengan memantau penggunaan CPU, RAM, dan suhu selama komputasi edge berlangsung.

Pada penelitian ini, Mikrokomputer digunakan untuk menjalankan komputasi edge dari data yang di kirim oleh mikrokontroler, yang meliputi kombinasi data, pembersihan data, serta *sampling* data. Oleh karena itu, perlu dipastikan bahwa beban kerja mikrokomputer tetap dalam batas yang aman selama proses ini berlangsung.

Tabel 3.5 Parameter Evaluasi Beban Mikrokomputer

Parameter	Deskripsi	Indikator Performa Baik
CPU Usage (%)	Persentase penggunaan CPU selama <i>pre-processing</i>	< 80% untuk menghindari overload
RAM Usage (MB)	Jumlah memori yang digunakan selama pemrosesan data	Minimal tersisa 200 MB untuk mencegah swapping
Suhu Mikrokomputer	Temperatur prosesor untuk mendeteksi overheating	< 75°C untuk menghindari thermal throttling

Pengukuran CPU usage dilakukan untuk mengetahui apakah mikrokomputer dapat menangani komputasi edge dalam jumlah besar tanpa mengalami overload. Jika CPU usage melebihi 80% dalam waktu lama, maka sistem berisiko mengalami penurunan performa atau keterlambatan pemrosesan.

Pengukuran RAM dilakukan untuk memastikan bahwa mikrokomputer memiliki cukup memori untuk menjalankan komputasi edge tanpa harus menggunakan swap memory. Jika memori tersisa kurang dari 200 MB, maka sistem bisa mengalami keterlambatan akibat penggunaan memori virtual di penyimpanan SSD, yang jauh lebih lambat dibandingkan RAM fisik.

Suhu mikrokomputer menjadi parameter penting karena proses komputasi edge yang intensif dapat meningkatkan suhu prosesor, yang berpotensi menyebabkan thermal throttling jika melebihi 75°C.

3.7.5. Validasi Hasil *Pre-processing* Data

Validasi hasil *pre-processing* data bertujuan untuk memastikan bahwa proses cleaning dan *sampling* telah dilakukan dengan benar, serta data yang tersimpan memenuhi standar kualitas yang telah ditetapkan. Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa data yang diolah dapat digunakan dalam analisis lebih lanjut tanpa adanya kesalahan yang dapat memengaruhi hasil penelitian. Validasi dilakukan dengan menguji beberapa aspek utama dari hasil *pre-processing*, yaitu keakuratan hasil cleaning, serta efektivitas metode *sampling*

Tabel 3.6 Parameter Evaluasi Validasi Hasil *Pre-Processing*

Parameter	Deskripsi	Indikator Validasi Berhasil
Validasi Hasil Cleaning Data	Memeriksa apakah <i>missing value</i> , <i>outlier</i> , dan duplikasi telah ditangani dengan benar	Tidak ada <i>missing value</i> , <i>outlier</i> telah difilter, dan duplikasi dihilangkan
Validasi Sampling Data	Mengecek apakah metode <i>sampling</i> telah menghasilkan data yang representatif	Data hasil <i>sampling</i> tetap mengikuti pola distribusi awal
Kinerja Penyimpan data	Memastikan bahwa semua data hasil <i>pre-processing</i> tersimpan dengan benar	Tidak ada data yang hilang atau korup,
Kualitas Data Tersimpan	Mengevaluasi apakah data memenuhi standar kualitas untuk analisis lebih lanjut	Rentang nilai tetap sesuai spesifikasi sensor, tidak ada distorsi data

Validasi hasil cleaning data dilakukan dengan memeriksa dataset hasil *pre-processing* untuk memastikan bahwa tidak ada lagi *missing value* yang belum tertangani, bahwa *outlier* telah dihapus menggunakan metode IQR, serta bahwa nilai duplikat telah dieliminasi. Data diperiksa menggunakan visualisasi atau statistik deskriptif untuk melihat apakah hasil cleaning telah berjalan sesuai dengan metode yang diterapkan. Validasi *sampling* data dilakukan dengan membandingkan hasil data setelah metode Modus diterapkan dengan data mentah sebelum *pre-processing*.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem C-FLUX Analyzer berhasil diintegrasikan dengan menggabungkan *Gas Analyzer*, *3D Anemometer*, dan komputasi edge dalam satu kesatuan sistem pemantauan emisi karbon yang lebih efisien.
2. Pengoptimalan *firmware* mikrokontroler mampu meningkatkan kestabilan pembacaan sensor secara simultan dengan kecepatan 7 data per detik, serta menurunkan *Jitter* dan *sensing time interval* secara signifikan.
3. Penggantian metode komunikasi dari TCP/IP ke serial berkontribusi besar dalam menurunkan latensi, meningkatkan *Data rate* , serta menyederhanakan proses pengiriman data antar perangkat.
4. Implementasi komputasi edge menggunakan mikrokomputer berhasil mengoptimalkan proses *pre-processing* data secara lokal, termasuk pembersihan data (handling missing value, outlier detection, duplicate removal) dan sampling data dengan metode global mode sampling.
5. Penggunaan *Battery Eliminator Circuit* (BEC) meningkatkan efisiensi distribusi daya, mengurangi kompleksitas sirkuit, serta memberikan kestabilan tegangan yang lebih baik bagi seluruh sistem.
6. Secara keseluruhan, sistem C-FLUX mampu meningkatkan akurasi, stabilitas, serta efisiensi pemantauan emisi karbon secara *real-time* untuk mendukung penelitian lingkungan berbasis IoT.

5.2. Saran

Beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini yaitu :

1. Mengintegrasikan sistem C-FLUX Analyzer dengan *model pengambilan keputusan berbasis data* yang memungkinkan pemantauan dan analisis fluks karbon secara *real-time*. Dengan sistem ini, dapat diberikan rekomendasi berbasis data untuk pengelolaan emisi karbon dan manajemen lahan yang lebih baik, seperti pemilihan lokasi optimal untuk penanaman atau konservasi vegetasi, serta intervensi untuk mengurangi emisi.
2. Untuk menghindari kondensasi yang dapat memengaruhi pengukuran kelembapan, disarankan untuk mengimplementasikan solusi manajemen kelembapan seperti penggunaan pelindung silikon atau pelapisan kedap air pada komponen elektronik. Penerapan sistem pemanas kecil di dalam perangkat juga dapat menjaga suhu perangkat tetap stabil dan menghindari pembentukan kondensasi yang dapat memengaruhi akurasi sensor kelembapan.
3. Peningkatan ketahanan perangkat dalam kondisi ekstrem bisa dicapai dengan menggunakan bahan pelindung yang lebih tahan terhadap suhu ekstrem, kelembapan, dan korosi. Penggunaan casing dengan material tahan cuaca, seperti plastik tahan UV atau logam tahan karat, serta melakukan pengujian jangka panjang di berbagai kondisi lingkungan, akan memperpanjang umur perangkat dan meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. H. H. Coimbra, B. Loubet, O. Laurent, L. Bignotti, M. Lozano, and M. Ramonet, "Eddy-covariance with slow-response greenhouse gas analyser on tall towers: bridging atmospheric and ecosystem greenhouse gases networks," *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, pp. 1–26, May 2024. DOI: [10.5194/amt-2024-71](https://doi.org/10.5194/amt-2024-71).
- [2] P. B. Suresha, C. Hegde, Z. Jiang, and G. D. Clifford, "An *Edge Computing* and Ambient Data Capture System for Clinical and Home Environments," *Sensors*, vol. 22, no. 7, p. 2511, Mar. 2022, doi: 10.3390/s22072511.
- [3] N. A. Mathin, A. Andang, dan F. M. S. Nursuwars, "Data Communication between Omron CP1L-E PLC and Arduino Portenta H7 using Modbus TCP Protocol," *J. Ilm. Setrum*, vol. 13, no. 2, pp. 115–124, Des. 2024, doi: 10.62870/setrum.v13i2.29148.
- [4] J. D. Prayugo, R. H. Triyanto, and S. Handaja, "Gas Analyzer system design in determining natural gas composition based on IoT," *INHARDWARE: Journal of Instrumentation and Hardware*, vol. 2, no. 1, pp. 8-13, Jun. 2024. DOI: 10.53026/inhardware.v1i2.32.
- [5] E. Arens, A. Ghahramani, R. Przybyla, M. Andersen, S. Min, T. Pfeffer, P. Raftery, M. Zhu, V. Luu, and H. Zhang, "Measuring 3D indoor air velocity via an inexpensive low-power ultrasonic anemometer," *Energy and Buildings*, vol. 219, p. 109805, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109805.
- [6] M. Ojha and R. Sikka, "An overview on applications of microcontroller," *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*, vol. 8, no. 6, pp. 402-405, Nov. 2021. DOI: 10.55524/ijirem.2021.8.6.87.
- [7] N. Llisterri Giménez, J. M. Solé, and F. Freitag, "Embedded federated learning over a LoRa mesh network," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 93, p. 101819, Jun. 2023. DOI: 10.1016/j.pmcj.2023.101819.
- [8] V. Kh. Abdrakhmanov, R. B. Salikhov, and S. A. Popov, "Experience of using *EasyEDA* to develop training boards on the PIC16f887 microcontroller," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2096, no. 1, p. 012098, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012098.
- [9] M. Bindu, Y. Anand, K. Siddhartha, dan P. Annapurna, "Design and Implementation of High-Speed Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART)," *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, vol. 8, no. 12, pp. 1–8, Dec. 2024. DOI: 10.55041/IJSREM40371.
- [10] Y. Sofyan and S. Fitriani, "Rancang Bangun Konverter Modbus RTU RS485 ke Modbus TCP/IP Berbasis ATMEGA2560," *Journal of Computer System*

- and Informatics (JoSYC)*, vol. 4, no. 3, pp. 470–477, May 2023, doi: 10.47065/josyc.v4i3.3522.
- [11] P. Arroba, R. Buyya, R. Cárdenas, J. L. Risco-Martín, and J. M. Moya, "Sustainable edge computing: Challenges and future directions," *Software: Practice and Experience*, vol. 54, no. 11, pp. 2272–2296, May 2024, doi: 10.1002/spe.3340.
 - [12] P. Asten, D. Nababan, dan Risald, "Analisis Kinerja Mikrokomputer Raspberry Pi Pada Smart Greenhouse Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Algoritma Naive Bayes," *J. Inform. dan Teknol. UNIMOR (JITU)*, vol. 3, no. 2, pp. 55–60, Sep. 2023, doi: 10.32938/jitu.v3i2.5231.
 - [13] H. D. Ghael, L. Solanki, and G. Sahu, "A review paper on Raspberry Pi and its applications," *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, vol. 2, no. 12, pp. 225–227, Dec. 2020. DOI: 10.35629/5252-0212225227.