Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Kualitas Udara Berbasis UAV Menggunakan ESP32 dan Komunikasi LoRa

Ilham Nurarifin Haryawan[1], Wirenda Sekar Ayu[2], Rizki Muliawan[3]

[1]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail : ilham.nurarifin.tptu23@polban.ac.id
[2]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail : wirendasekar@polban.ac.id
[3]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail : rizki.muliawan@polban.ac.id

ABSTRAK

Pemantauan kualitas udara menggunakan sistem stasioner memiliki keterbatasan jangkauan spasial dan fleksibilitas pengambilan data. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas udara berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menggunakan ESP32, sensor MQ-135, DHT22, dan komunikasi LoRa SX1278 untuk mengukur konsentrasi karbon dioksida (CO_2), suhu, dan kelembapan secara *real-time*. Sistem terdiri atas unit *transmitter* yang dipasang pada UAV, unit *receiver* yang menerima data melalui LoRa, serta *platform Internet of Things* (IoT) yang menampilkan data dan menyimpannya dalam format CSV. Kinerja sensor dievaluasi melalui kalibrasi terhadap alat ukur referensi menggunakan analisis regresi linier. Hasil kalibrasi menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,8369 untuk CO_2, 0,7975 untuk suhu, dan 0,9571 untuk kelembapan. Sistem berhasil memantau CO_2 pada rentang 430–770 ppm, suhu 30,2–31,9 °C, dan kelembapan 59,3–65,0% RH selama pengoperasian UAV. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu melakukan akuisisi dan transmisi data secara *real-time* serta memberikan solusi yang portabel dan fleksibel untuk pemantauan kualitas udara.

Kata Kunci
Pemantauan Kualitas Udara, UAV, ESP32, LoRa, MQ-135

Air quality monitoring using stationary systems is limited in terms of spatial coverage and data collection flexibility. This study aims to design and implement an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based air quality monitoring system utilizing an ESP32, MQ-135 and DHT22 sensors, and LoRa SX1278 communication to measure carbon dioxide (CO_2) concentration, temperature, and humidity in real-time. The system comprises a transmitter unit mounted on the UAV, a receiver unit that acquires data via LoRa, and an Internet of Things (IoT) platform that displays the data and stores it in CSV format. Sensor performance was evaluated through calibration against reference instruments using linear regression analysis. Calibration results yielded R^2 values of 0.8369 for CO_2, 0.7975 for temperature, and 0.9571 for humidity. The system successfully monitored CO_2 levels in the 430–770 ppm range, temperatures between 30.2–31.9°C, and humidity levels between 59.3–65.0% RH during UAV operation. These results demonstrate that the developed system is capable of real-time data acquisition and transmission, offering a portable and flexible solution for air quality monitoring.

Keywords
Air Quality Monitoring, UAV, ESP32, LoRa, MQ-135

1. PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kesehatan, kenyamanan, serta produktivitas manusia, baik di lingkungan dalam maupun luar ruangan. Parameter kualitas udara yang umum digunakan meliputi konsentrasi karbon dioksida (CO_2), suhu, dan kelembapan. Konsentrasi CO_2 sering dijadikan indikator kecukupan ventilasi karena peningkatan kadar CO_2 menunjukkan menurunnya kualitas udara akibat aktivitas manusia maupun sumber pencemar di lingkungan (1). WHO menekankan pentingnya kualitas udara dalam ruangan yang baik untuk mencegah masalah pernapasan serta meningkatkan kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas individu (2).

Standar kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality* (IAQ)) mempertimbangkan berbagai faktor fisik, kimia, biologis, dan tingkat partikel, termasuk suhu udara, kelembapan, pergerakan udara, tingkat ventilasi, CO_2, NO_2, SO_2, VOC, *Formaldehyde*, PM2,5 dan PM10. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) menetapkan standar terkait tingkat ventilasi dan prosedur IAQ untuk menjaga kualitas udara ruangan. ASHRAE menetapkan kandungan CO_2 udara di dalam ruang sebagai indikator kualitas udara dan kecukupan ventilasi di dalam ruang (3). Konsentrasi CO_2 yang dapat ditolerir di dalam ruang kurang dari 1000 ppm, sedangkan di udara luar berkisar antara 300 – 500 ppm (4).

Perkembangan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) memberikan alternatif dalam proses *monitoring* lingkungan karena mampu melakukan pengambilan data secara fleksibel pada berbagai lokasi pengukuran. UAV dapat membawa perangkat sensor menuju titik-titik yang sulit dijangkau oleh manusia, sehingga proses akuisisi data menjadi lebih cepat dan efisien. Integrasi UAV dengan sistem sensor juga memungkinkan pengambilan data secara *mobile* tanpa harus memasang stasiun pengukuran permanen pada setiap lokasi (5)(6).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis UAV menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor MQ-135, sensor DHT22, serta komunikasi LoRa. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu melakukan pengukuran konsentrasi CO_2, suhu, dan kelembapan secara *real-time* sehingga dapat meningkatkan fleksibilitas proses *monitoring* dibandingkan dengan metode pengukuran konvensional. Dalam penelitian ini, sensor MQ-135 digunakan untuk mengestimasi konsentrasi CO_2, sedangkan sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. Seluruh data hasil pengukuran dikirim menggunakan komunikasi LoRa menuju unit *receiver*, kemudian ditampilkan pada *platform monitoring* serta disimpan sebagai data arsip.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Penelitian Sebelumnya

Tabel 1. Penelitian Sebelumnya

Penelitian	Hasil	Kekurangan
Zulfiryansyah (2022)	UAV *monitoring* kualitas udara	Belum IoT
Harpad (2022)	ESP32 + IoT	Tidak menggunakan UAV
Mahfudi (2024)	LoRa SX1278	Tidak *monitoring* udara
Raihan Nanda (2024)	UAV + ESP32	Belum integrasi LoRa dan *platform* IoT

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, penelitian ini mengintegrasikan UAV, ESP32, LoRa SX1278, *ThingSpeak*, dan MIT *App Inventor* sehingga menghasilkan sistem *monitoring* kualitas udara yang portabel dengan komunikasi jarak jauh serta pemantauan *real-time*.

2.2 Drone SJRC F11S 4K Pro

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) adalah salah satu jenis pesawat tanpa awak yang memiliki empat motor dan dilengkapi dengan empat *propeller* pada masing-masing motornya yang digunakan untuk terbang dan bermanuver. Masing-masing rotor (baling-baling dan motor penggeraknya) menghasilkan daya angkat dan memiliki jarak yang sama terhadap pusat massa wahana (7).

Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis UAV dengan sensor gas dan komunikasi nirkabel. Zulfiryansyah dkk. Mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara menggunakan UAV quadcopter, namun sistem tersebut masih berfokus pada akuisisi data tanpa integrasi *platform* IoT secara *real-time.* Penelitian lain oleh Harpad dkk. Mengembangkan *monitoring* kualitas udara berbasis ESP32 dan IoT, tetapi menggunakan sistem stasioner sehingga belum mendukung pemetaan secara bergerak. Berdasarkan penelitian tersebut, penelitian ini mengintegrasikan UAV, komunikasi LoRa SX1278, *ThingSpeak*, dan MIT *App Inventor* sehingga mampu melakukan *monitoring* kualitas udara secara portabel dan *real-time.*

2.3 Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler yang menjadi pembeda ESP32 memiliki *WiFi* dan *Bluetooth*, yang akan sangat membantu untuk membangun *Internet of Things* (IOT) yang membutuhkan konektivitas nirkabel. Fungsi ini tidak termasuk dalam ESP8266, maka ini merupakan peningkatan. Kelebihan dari ESP32 yaitu mendukung konektivitas *WiFi* dan *Bluetooth,* didukung oleh sumber daya program yang luas serta harganya yang terjangkau dan mudah didapat (8).

2.4 Internet Of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) adalah interaksi antara sesama mesin yang terhubung secara otomatis tanpa campur tangan pengguna dan dalam jarak berapa pun. Agar tercapai cara kerja IoT tersebut di atas, internet menjadi penghubung di antara kedua interaksi mesin tersebut, sementara pengguna hanya bertugas sebagai pengatur dan pengawas kerja alat tersebut secara langsung. Manfaat yang didapatkan dari konsep IoT ialah pekerjaan yang dilakukan bisa menjadi lebih cepat, mudah dan efisien (9).

2.5 Sensor MQ135

Sensor MQ-135 merupakan sensor gas berbasis *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) yang menggunakan material sensitif berupa Timah Dioksida (SnO_2). Pada kondisi udara bersih, resistansi sensor relatif tinggi. Ketika terdapat gas tertentu di lingkungan, seperti karbon dioksida (CO_2), amonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x), benzena, asap, dan uap alkohol, konduktivitas material SnO_2 meningkat sehingga resistansi sensor menurun (10). Perubahan resistansi tersebut kemudian dikonversi menjadi sinyal analog yang dapat dibaca oleh mikrokontroler untuk diolah menjadi nilai konsentrasi gas dalam satuan *parts per million* (ppm) (11).

2.6 Sensor DHT22

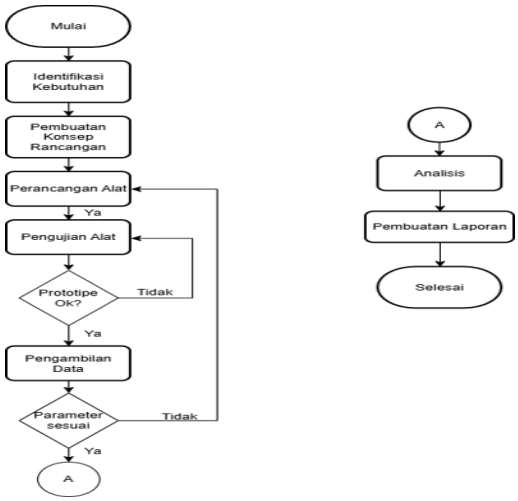
Sensor DHT22, atau yang juga dikenal dengan modul AM2302, adalah sensor digital komposit yang dirancang khusus untuk mengukur suhu dan kelembapan udara *(Relative Humidity)* di lingkungan sekitarnya. Secara konstruksi internal, sensor DHT22 terdiri dari dua komponen penginderaan utama: elemen sensor kelembapan tipe kapasitif dan sensor suhu tipe termistor *Negative Temperature Coefficient* (NTC). Selain itu, sensor ini juga terintegrasi dengan mikrokontroler 8-bit berkinerja tinggi yang berfungsi sebagai *Analog-to-Digital Converter* (ADC) (12)(13). Mikrokontroler ini mengalibrasi pembacaan secara otomatis dan mengeluarkan data dalam bentuk sinyal digital terkalibrasi melalui komunikasi *single-bus* (satu kabel data) (14).

2.7 LoRa SX1278

LoRa *(Long Range)* merupakan teknologi frekuensi radio nirkabel yang diproduksi dan dipatenkan oleh perusahaan Semtech dengan modulasi yang mampu mencapai sensitivitas hingga -148 dBm. Modul *transceiver* SX1278 merupakan seri LoRa berkualitas tinggi yang menyediakan fitur modem *Long Range* untuk komunikasi jarak jauh dengan jangkauan hingga 15 km menggunakan daya yang cukup kecil dan tahan interferensi serta meminimalkan konsumsi arus. Modul SX1278 memiliki frekuensi 137–525 MHz dengan *bit rate* efektifnya 0.0018–37.5 Kbps (15).

3. METODOLOGI

3.1 Tahap Pelaksanaan



Gambar 1. Diagram alir tahap pelaksanaan

3.2 Perancangan Hardware

Proses perancangan perangkat keras adalah proses pemilihan komponen utama dan komponen pendukung yang akan digunakan pada prototipe. Komponen utama yang digunakan seperti UAV, mikrokontroler, sensor, kabel, catu daya dan filamen PLA+. Sedangkan komponen pendukung terdiri dari baut, mur dan lain-lain. Komponen-komponen yang digunakan akan dipilih sesuai dengan kebutuhan yang telah dirumuskan. Tabel 1 berikut merupakan komponen-komponen yang dibutuhkan untuk membuat prototipe tersebut.

Tabel 1. Kebutuhan Komponen

No	Komponen	Spesifikasi
1	*Unmanned Aerial Vehicle* (UAV)	SJRC F11S 4K *Pro*
2	*Microcontroller*	ESP32
3	Sensor Gas	MQ135
4	Sensor Suhu dan Kelembapan	DHT22
5	*Transmitter* dan *Receiver*	LORA SX1276
6	*Casing* Komponen Elektronika	*Filamen* PLA+
7	Baterai	*Litium* 18650
8	Modul SD *Card*	Modul TF *Card* MP3
9	*Real Time Clock*	DS3231
10	Modul *Step-down*	LM2596

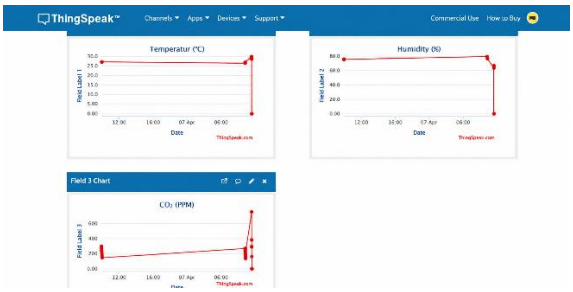
Pada tahapan ini dilakukan proses pembuatan desain *casing* komponen secara 3 dimensi dengan tujuan untuk menyesuaikan bentuk, ukuran dan penempatan seluruh komponen elektronika. *Casing* komponen elektronika ini juga bertujuan agar proses pencetakan *casing* komponen elektronika bisa sesuai dengan dimensi UAV. *Casing* dirancang dengan dimensi panjang 120 mm, lebar 49 mm, dan

tinggi 60 mm untuk mengakomodasi seluruh komponen elektronik.

Gambar 2. Desain 3D casing prototipe

3.3 Perancangan *Software*

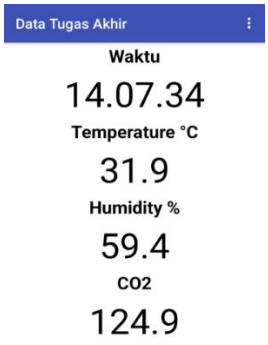
Dalam penelitian ini, *cloud server* yang digunakan adalah *ThingSpeak*. *Cloud server* ini diakses melalui web *ThingSpeak.com* yang bersifat gratis, sehingga semua orang bisa menggunakan *cloud server* ini dan mengreasikannya sesuai dengan kebutuhan. *Cloud server* ini memiliki delapan buah visualisasi yang dapat diatur, empat *widget, public & private view,* dan ekspor & impor data.



Gambar 3. Tampilan cloud server Thingspeak

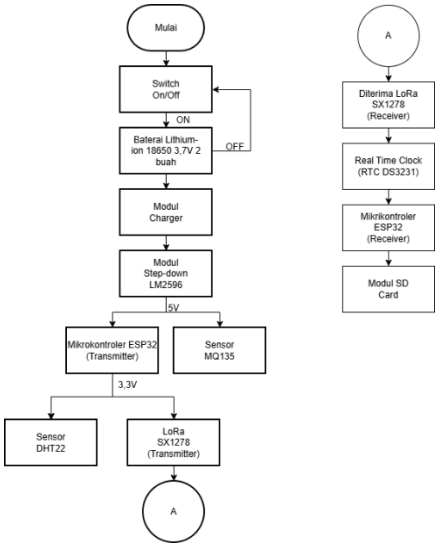
Selain ditampilkan pada *ThingSpeak,* data yang sama juga diakses oleh aplikasi MIT *App Inventor* melalui API *ThingSpeak* sehingga pengguna dapat memonitor kondisi kualitas udara menggunakan perangkat *smartphone Android* secara *real-time*.

Berikut merupakan tampilan MIT *App Inventor smartphone*:



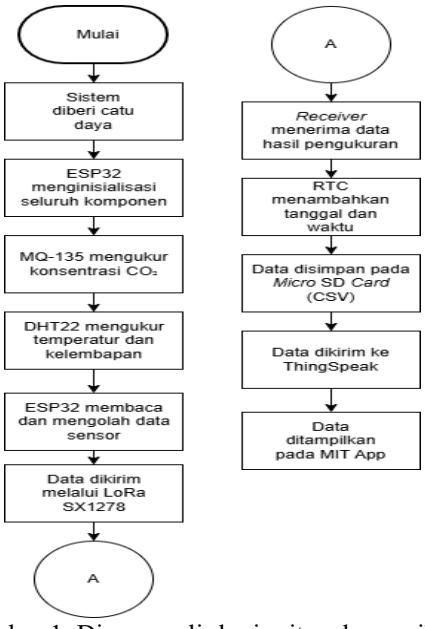
Gambar 4. Tampilan MIT App Inventor

3.4 Perancangan Sistem Komunikasi



Gambar 5. Diagram alir proses system

Komunikasi data antara unit *transmitter* dan *receiver* menggunakan modul LoRa SX1278 berjalan dengan baik selama proses pengujian. Seluruh data hasil pembacaan sensor berhasil diterima oleh *receiver* sebelum diteruskan ke *platform monitoring* melalui jaringan *WiFi.*



Gambar 1. Diagram alir kerja sitem komunikasi

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun sistem *monitoring* kualitas udara berbasis UAV yang terdiri atas unit *transmitter* dan unit *receiver*. Integrasi mikrokontroler ESP32 dengan sensor MQ-135 dan DHT22 memungkinkan sistem mengukur konsentrasi karbon dioksida (CO_2), suhu, dan kelembapan secara simultan, sedangkan komunikasi LoRa SX1278 berhasil mengirimkan data secara *real-time* menuju unit *receiver.* Seluruh data hasil pengukuran berhasil

ditampilkan pada *platform monitoring* dan disimpan dalam format CSV, yang menunjukkan keandalan sistem dalam proses akuisisi, transmisi, dan penyimpanan data.

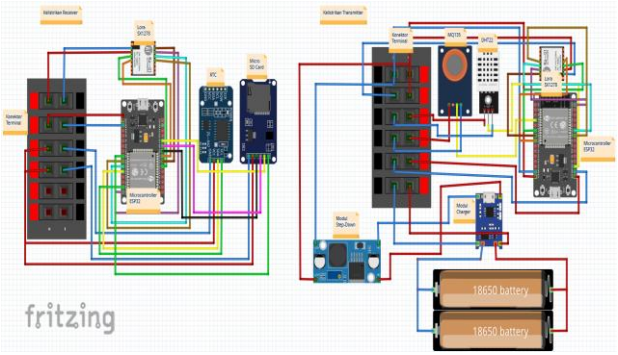
Penggunaan LoRa memberikan beberapa keuntungan, di antaranya konsumsi daya yang rendah, jangkauan komunikasi yang relatif jauh, serta kestabilan transmisi data selama UAV melakukan penerbangan. Integrasi antara komunikasi LoRa dan ESP32 memungkinkan sistem melakukan *monitoring* secara *real-time* tanpa memerlukan koneksi *internet* pada sisi UAV, sehingga proses pengiriman data menjadi lebih fleksibel.

1. Kelistrikan *Transmitter*

Perancangan diagram kelistrikan *transmitter* bertujuan untuk menghubungkan seluruh komponen elektronika sehingga dapat bekerja sebagai satu kesatuan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis UAV. Berikut merupakan gambar komunikasi *transmitter* yang dibuat menggunakan *software Fritzing.*

2. Kelistrikan *Receiver*

Perancangan diagram *wiring receiver* bertujuan untuk membangun sistem penerima data hasil *monitoring* kualitas udara yang dikirimkan oleh unit *transmitter* melalui komunikasi LoRa. Berikut merupakan gambar komunikasi *receiver* yang dibuat menggunakan *software Fritzing.*



Gambar 7. Kelistrikan transmitter dan receiver

3.5 Kalibrasi Sensor

Gambar 8. *Carbon dioxide detector* dan *temperature and humidity meter.*

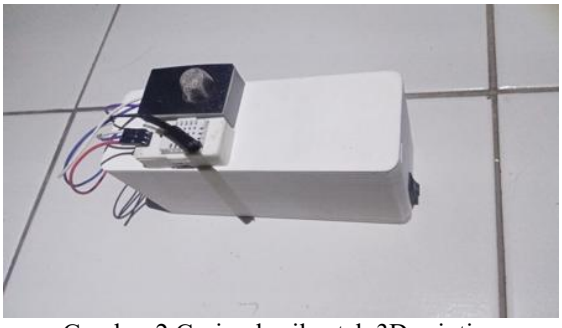
Sebelum digunakan pada proses pengambilan data, sensor MQ-135 dan DHT22 dikalibrasi menggunakan alat ukur referensi. Sensor MQ-135 dibandingkan dengan alat ukur *Smart Sensor Carbon Dioxide Detector* AR8200, sedangkan sensor DHT22 dibandingkan dengan *temperature and humidity meter.*

Model dan spesifikasi alat ukur pada Gambar 8: model CO_2 meter, yaitu smart sensor AR8200, memiliki rentang 350–9999 ppm dengan resolusi 1 ppm dan akurasi pembacaan ±50 ppm ±5%. Sedangkan untuk model *temperature and humidity meter,* yaitu TA622B memiliki rentang suhu −40–80 °C dengan akurasi suhu ±0,4 °C dan rentang kelembapan 10–90% RH dengan akurasi kelembapan ±3% RH. Metode pengujian yang akan dilakukan menggunakan tiga kondisi, yaitu kondisi ruang tertutup, kondisi ruang terbuka dan kondisi aktivitas tinggi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Tahap Pelaksanaan

Gambar 11 merupakan hasil casing komponen elektronika yang merupakan hasil pencetakan secara 3 dimensi dengan menggunakan bahan filamen berjenis PLA+.



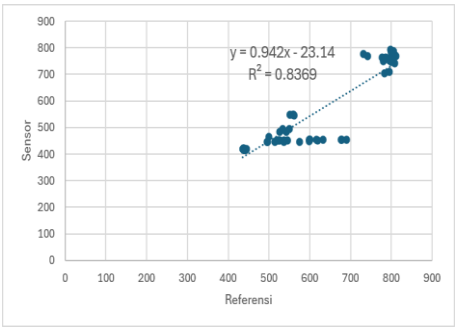
Gambar 2 Casing hasil cetak 3D printing

Sementara itu, pada Gambar 12, sistem berhasil dipasang pada UAV dan seluruh komponen bekerja dengan baik selama pengujian. UAV diterbangkan selama kurang lebih 10 menit, Durasi penerbangan tersebut disesuaikan dengan kapasitas baterai UAV karena adanya beban perangkat *monitoring* kualitas udara yang menyebabkan konsumsi daya meningkat sehingga waktu terbang menjadi lebih singkat.

Gambar 3. Prototipe dengan UAV

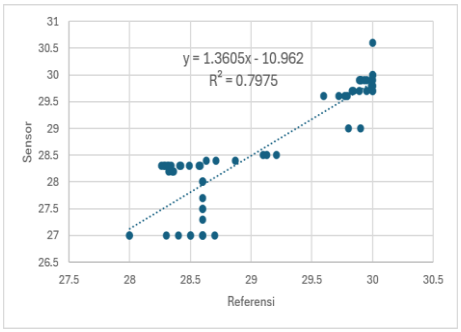
4.2 Hasil Kalibrasi Alat Ukur dan Sensor

Gambar 13 di bawah ini merupakan hasil kalibrasi regresi linier sensor MQ-135 yang menunjukkan nilai koefisien determinasi sebesar 0,8369, yang mengindikasikan adanya hubungan yang cukup kuat antara hasil pembacaan sensor dengan alat ukur referensi CO_2 meter.



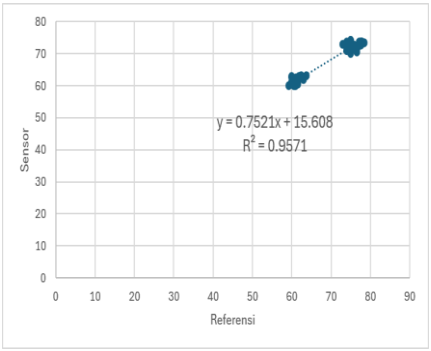
Gambar 4. Hasil kalibrasi grafik regresi linear MQ135

Gambar 14 di bawah ini merupakan hasil kalibrasi regresi linier pengukuran yang menunjukkan hubungan antara hasil pembacaan sensor DHT22 dan alat ukur suhu dan kelembapan, dengan nilai R^2 sebesar 0,7975 untuk pengukuran suhu.



Gambar 5. Hasil kalibrasi grafik regresi linear DHT22 suhu

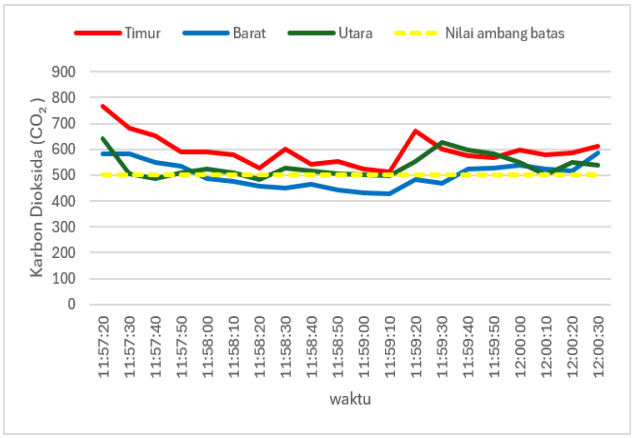
Gambar 15 di bawah ini merupakan hasil kalibrasi DHT22. Pengukuran kelembapan menunjukkan bahwa hasil alat ukur kelembapan meter sensor DHT22 menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9571 untuk pengukuran kelembapan.



Gambar 6. Hasil kalibrasi grafik regresi linear DHT22 kelembapan

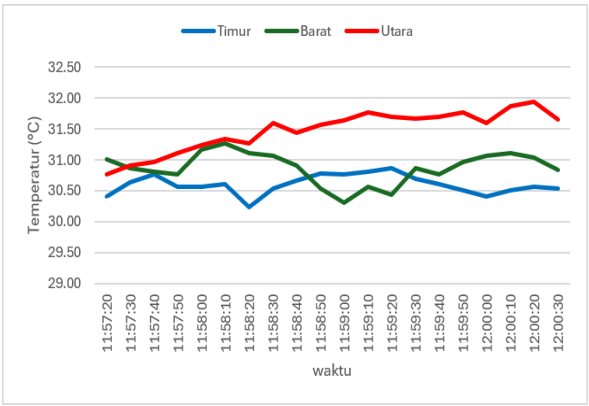
4.3 Hasil *Monitoring* Kualitas Udara

Pengambilan data dilaksanakan selama tiga hari. Pada sisi timur, barat, dan utara Gedung Sushi Yay di Jalan Raya Cibabat No. 134, Kecamatan Cimahi Tengah, Kota Cimahi. Ketinggian terbang UAV disesuaikan dengan tinggi bangunan pada lokasi pengujian area *intake ducting fresh air* dan area sekeliling bangunan Gedung Sushi Yay. UAV diterbangkan selama kurang lebih 10 menit.



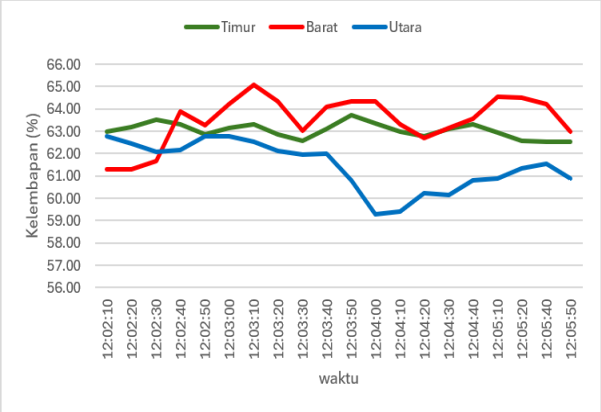
Gambar 7. Grafik rata-rata karbon dioksida

Gambar 16 memperlihatkan bahwa konsentrasi CO_2 selama pengujian berada pada rentang 430–770 ppm. Apabila dibandingkan dengan nilai ambang batas sebesar 500 ppm, sebagian besar hasil pengukuran masih berada di atas ambang batas tersebut, terutama pada sisi timur dan utara. Sebaliknya, beberapa hasil pengukuran pada sisi barat berada di bawah ambang batas, yaitu sekitar 430–490 ppm, yang menunjukkan kondisi udara lebih baik pada lokasi tersebut. Seluruh data berhasil ditampilkan secara *real-time* pada *platform monitoring* serta direkam pada media penyimpanan lokal tanpa kehilangan data selama proses pengujian.



Gambar 8 Grafik rata-rata suhu

Gambar 17 menunjukkan bahwa suhu berkisar antara 30,2–31,9 °C. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan kondisi lingkungan pada setiap titik pengukuran yang dilalui UAV.



Gambar 9. Grafik rata-rata kelembapan

Gambar 18 menunjukkan bahwa kelembapan berada pada kisaran 59,3–65,0% RH. Sistem mampu melakukan akuisisi data pada beberapa titik hanya dalam satu kali penerbangan, sehingga waktu pengambilan data menjadi lebih efisien dan distribusi kualitas udara dapat diamati dengan lebih baik.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor MQ-135, sensor DHT22, dan komunikasi LoRa SX1278. Sistem mampu mengukur konsentrasi karbon dioksida (CO_2), suhu, dan kelembapan secara simultan serta mengirimkan data secara *real-time* menuju unit *receiver* untuk ditampilkan pada *platform monitoring* dan disimpan dalam format CSV. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap alat ukur referensi dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8369 untuk MQ-135, 0,7975 untuk suhu, dan 0,9571 untuk kelembapan. Selain itu, implementasi pada UAV menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi secara stabil selama proses penerbangan dan memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam pengambilan data dibandingkan dengan metode *monitoring* statis. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan berpotensi menjadi solusi yang portabel, fleksibel, dan andal untuk aplikasi *monitoring* kualitas udara secara *real-time.*

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Bandung yang telah membantu dalam pendanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Zulfiryansyah F, et al. Air Quality Monitoring System using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadcopter Type Sistem Monitoring Kualitas Udara menggunakan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Jenis Quadcopter. 2022.
2. World Health Organization. WHO Global Air Quality Guidelines. Geneva: World Health Organization; 2021.
3. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE; 2022.
4. Abougharib A, Elhoseny M, Gunasekaran M. UAV-based environmental monitoring systems: a review. Sensors. 2021;21(17).
5. Persily AK, de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. Indoor Air. 2021;27(5):868–79.
6. Harpad BS, et al. IoT-based air quality monitoring system using ESP32. International Journal of Innovative Research in Science and Engineering. 2022;8(3).
7. Santoso JT, Kom S, Kom M. Geographic Information System (GIS): sistem informasi geografis.
8. Pratama K, Setiawan EB. Implementasi monitoring kualitas udara menggunakan peramalan exponential smoothing dan NodeMCU berbasis mobile Android. 2022;9(2).
9. Nurul DLH, Rohmah F, Soffa Z. Prototype smart home dengan modul NodeMCU ESP8266 berbasis Internet of Things (IoT). 2020.
10. Nanda RR, Ayu WS, Arman M. Rancang bangun sistem monitoring pencemaran udara berbasis Unmanned Aerial Vehicle (UAV) dengan menggunakan microcontroller ESP32.
11. Wijayanti D, et al. Calibration of MQ-135 gas sensor for carbon dioxide monitoring. Journal of Physics: Conference Series. 2021;2111.
12. Liu T. Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302) capacitive-type humidity and temperature module/sensor. 2023.
13. Mahfudi I, Soelistianto A, F, Aditya A, Meylinda D, Y. Analisis dan optimasi kinerja transmisi LoRa SX1278 Ra-02 untuk sistem monitoring kualitas air Internet of Things. 2024.
14. Aosong Electronics. AM2302 (DHT22) temperature and humidity sensor datasheet. Guangzhou, China; 2023.
15. Qowiyah AAI, Akhmad S, Wildan WS. Implementasi data logger menggunakan SD Card pada pembangkit listrik tenaga surya di tambak udang Banjarsari Kecamatan Tanggulangin Kabupaten Sidoarjo Jawa Timur. 2025.