

**RANCANG BANGUN SISTEM *MONITORING* DAN
CONTROLLING KUALITAS UDARA *INDOOR* BERBASIS IOT**

TUGAS AKHIR

Diajukan Oleh:

ALIF FURQAN

220714009

Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi

Program Studi Teknik Fisika



**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI AR-RANIRY**

BANDA ACEH

2026 M / 1448 H

LEMBAR PERSETUJUAN

**RANCANG BANGUN SISTEM *MONITORING* DAN *CONTROLLING*
KUALITAS UDARA *INDOOR* BERBASIS IOT**

TUGAS AKHIR

Diajukan Kepada Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN)
Ar-Raniry Banda Aceh Sebagai Salah Satu Syarat Studi Memperoleh Gelar Sarjana (S1)
dalam Prodi Teknik Fisika

Oleh:

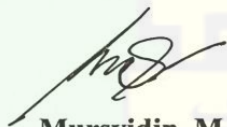
**ALIF FURQAN
220714009**

**Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi
Program Studi Teknik Fisika**

Disetujui untuk Dimunaqasyahkan Oleh:

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Mursyidin, M.T.

NIP. 198204052023211020

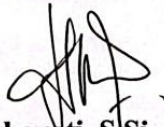


Nurhayati, S.Si., M.Si.

NIP. 198905142014032002

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Fisika,



Nurhayati, S.Si., M.Si.

NIP. 198905142014032002

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN SISTEM *MONITORING* DAN *CONTROLLING* KUALITAS UDARA *INDOOR* BERBASIS IOT

TUGAS AKHIR

Telah Diuji oleh Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri (UIN) Ar-Raniry Banda Aceh dan Dinyatakan Lulus serta
Diterima sebagai Salah Satu Beban Studi Program Sarjana
(S-1) dalam Prodi Teknik Fisika

Pada Hari/Tanggal: Senin, 22 Juni 2026 M
07 Muharram 1448 H

di Darussalam, Banda Aceh

Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir:

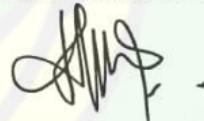
Ketua/Pembimbing I,



Mursyidin, M.T.

NIP. 198204052023211020

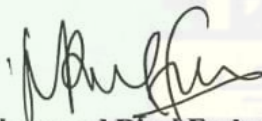
Sekretaris/Pembimbing II,



Nurhayati, S.Si., M.Si.

NIP. 198905142014032002

Penguji I,



Muhammad Rizal Fachri, S.T., M.T.

NIP. 198807082019031018

Penguji II,



Mulyadi Abdul Wahid, M.Sc.

NIP. 198011152014031001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Ar-Raniry Banda Aceh



Prof. Dr. Jr. Muhammad Dirhamsyah, MT., IPU
NIP. 196210021988111001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Alif Furqan

NIM : 220714009

Program Studi : Teknik Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul : Rancang Bangun Sistem *Monitoring* dan *Controlling* Kualitas Udara *Indoor* berbasis IoT

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam penulisan tugas akhir ini, saya:

1. Tidak menggunakan ide orang lain tanpa mampu mengembangkan dan mempertanggungjawabkannya;
2. Tidak melakukan plagiasi terhadap naskah karya orang lain;
3. Tidak menggunakan karya orang lain tanpa menyebutkan sumber asli atau tanpa izin pemilik karya;
4. Tidak memanipulasi dan memalsukan data;
5. Mengerjakan sendiri karya ini dan mampu bertanggung jawab atas karya ini.

Apabila di kemudian hari ada tuntutan dari pihak lain atas karya saya, dan setelah melalui pembuktian yang dapat dipertanggungjawabkan ternyata ditemukan bukti bahwa saya telah melanggar pernyataan ini, maka saya siap dikenai sanksi berdasarkan aturan yang berlaku di Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan tanpa paksaan dari pihak mana pun.

Banda Aceh, 13 Mei 2026

Yang Menyatakan,



(Alif Furqan)

ABSTRAK

Nama : Alif Furqan
NIM : 220714009
Program Studi : Teknik Fisika
Judul : Rancang Bangun Sistem *Monitoring* dan *Controlling*
Kualitas Udara *Indoor* Berbasis IoT
Tanggal Sidang : 22 Juni 2026
Jumlah Halaman : 50 halaman
Pembimbing I : Mursyidin, M.T.
Pembimbing II : Nurhayati, S.Si., M.Si.
Kata Kunci : Mikrokontroler, *Internet of Things*, filtrasi udara, karbon dioksida, sensor gas.

Fenomena pencemaran udara akibat peningkatan emisi karbon juga sejalan dengan pandangan Al-Qur'an yang menyebutkan bahwa kerusakan di bumi terjadi akibat perbuatan manusia (QS. Ar-Rūm: 41). Peningkatan aktivitas manusia sehari-hari berkontribusi signifikan terhadap meningkatnya emisi gas, khususnya Carbon Dioxide (CO₂), yang berdampak negatif terhadap kualitas udara dan kesehatan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji efektivitas sistem filtrasi emisi berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu mendeteksi konsentrasi gas di udara serta melakukan tindakan filtrasi secara otomatis ketika kadar emisi melebihi ambang batas yang ditentukan. Metode yang digunakan adalah rekayasa eksperimen skala kecil dengan pengujian dalam wadah kotak kardus kedap udara berukuran 75,5×50×42,5 cm menggunakan asap rokok sebagai sumber polutan. Sistem mengintegrasikan sensor ENS160 sebagai pendeteksi eCO₂, kipas DC 12V sebagai aktuator filtrasi, karbon aktif iodine 1000 tipe mikropori sebanyak 60 gram yang dibalut kain filtrasi 50 mesh sebagai media adsorben, serta platform IoT Blynk untuk pemantauan data secara *real-time*. Aktuator diprogram agar aktif otomatis pada ambang batas 600 ppm dan non-aktif ketika nilai eCO₂ dibawah 600 ppm. Hasil pengujian sistem filtrasi berbasis karbon aktif yang dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan mampu menurunkan nilai eCO₂ dari rentang konsentrasi awal 2.121–3.777 ppm menjadi stabil pada kisaran 554–558 ppm, dengan waktu pencapaian kestabilan berkisar antara 12 menit 44 detik hingga 24 menit 6 detik. Efisiensi penurunan eCO₂ pada kelima pengujian berkisar antara 73,69%–85,33%, dengan efisiensi rata-rata sebesar 80,48%, sehingga menunjukkan efektivitas yang baik dalam mengurangi kadar estimasi eCO₂ yang terdeteksi oleh sensor pada udara *indoor*.

ABSTRACT

Name : Alif Furqan
Student ID : 220714009
Study Program : Physics Engineering
Title : Design and Development of an IoT-Based Indoor Air
Quality Monitoring and Controlling System
Thesis Defense Date : 22 June 2026
Number of Pages : 50 pages
Supervisor I : Mursyidin, M.T.
Supervisor II : Nurhayati, S.Si., M.Si.
Keywords : Microcontroller, Internet of Things, air filtration, carbon
dioxide, gas sensor.

The phenomenon of air pollution due to increased carbon emissions is also in line with the Qur'anic view that corruption on earth occurs as a result of human actions (QS. Ar-Rūm: 41). The increase in daily human activities particularly Carbon Dioxide (CO₂), which negatively impacts air quality and human health. This study aims to design and test the effectiveness of an Internet of Things (IoT)-based emission filtration system capable of detecting gas concentrations in the air and automatically performing filtration when emission levels exceed a predetermined threshold. The method used is small-scale experimental engineering, with testing conducted in an airtight cardboard box measuring 75.5×50×42.5 cm using cigarette smoke as the pollutant source. The system integrates an ENS160 sensor as the eCO₂ detector, a 12V DC fan as the filtration actuator, 60 grams of iodine-type 1000 microporous activated carbon wrapped in 50-mesh filtration fabric as the adsorbent medium, as well as the Blynk IoT platform for real-time data monitoring. The actuator is programmed to activate automatically when the threshold of 600 ppm is reached and deactivate when the eCO₂ value falls below 600 ppm. The test results, conducted over 5 repetitions, show that the activated carbon-based filtration system was able to reduce eCO₂ concentrations from an initial range of 2,121–3,777 ppm to a stable range of 554–558 ppm, with stabilization times ranging from 12 minutes 44 seconds to 24 minutes 6 seconds. The reduction efficiency of eCO₂ across the five tests ranged from 73.69% to 85.33%, with an average efficiency of 80.48%, demonstrating good effectiveness in reducing the estimated eCO₂ levels detected by the sensor in indoor air.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur peneliti panjatkan ke hadirat Allah ﷻ atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya serta shalawat kepada Nabi Muhammad ﷺ. Atas perihal tersebut, peneliti dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Rancang Bangun Sistem *Monitoring* dan *Controlling* Kualitas Udara Indoor Berbasis IoT”**. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana S-1 pada Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh. Pada kesempatan ini, peneliti ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, serta kontribusi dalam penyusunan tugas akhir ini, di antaranya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Muhammad Dirhamsyah, MT., IPU., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.
2. Dr. Abd Mujahid Hamdan, M.Sc., selaku Wakil Dekan III Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh sekaligus pembimbing akademik peneliti yang selalu aktif membimbing dan memberikan arahan, kontribusi, serta ide riset selama masa studi, baik didalam maupun diluar lingkungan perkuliahan.
3. Nurhayati, S.Si., M.Si., selaku Ketua Program Studi Teknik Fisika, Mulyadi Abdul Wahid, M.Sc., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Fisika, dan juga Maria Ulfa S.Pd.I., M.A selaku Operator Program Studi Teknik Fisika.
4. Hadi Kurniawan, M.Si selaku Kepala Lab Multifungsi, Kamal Karazi, S.T selaku Laboran Teknik Fisika, yang telah menyediakan peralatan guna menyelesaikan penelitian ini, dan juga para laboran lain yang tidak dapat peneliti sebutkan satu persatu.
5. Mursyidin, M.T., selaku dosen pembimbing I dan Nurhayati, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing II dalam tugas akhir ini yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta kontribusi baik secara peralatan maupun penulisan kepada peneliti selama proses penyusunan tugas akhir.

6. Dr. Sri Nengsih S.Si. M.Sc, Dr. Eng Nur Aida M.Sc., M. Rizal Fachri M.T., Suardi Nur S.T.,M.Sc.,Ph.D dan dosen-dosen Fakultas Sains dan Teknologi yang telah memberikan ilmu bermanfaat, dukungan, dan partisipasi dalam segala aspek perkuliahan selama masa studi.
7. Orang tua tercinta. Ayahanda Mahrifan, S.T. dan Ibunda Dahlia Yamani, S.T. serta keluarga-keluarga peneliti. Peneliti mengucapkan terima kasih atas kepercayaan, kesabaran, keyakinan yang selalu diberikan serta dukungan moril dan material dalam kehidupan peneliti. Adapun ucapan spesial kepada Muamar Fauzan, Muhammad Raffi, dan Aufar Raihan selaku para adik laki-laki peneliti.
8. Teman-teman Teknik Fisika seperjuangan peneliti. Terutama kepada Qhusay Rizki Ramadhan, Mufirati Akram, Saiful Rizal dan Rikki Mefta F. yang andil membantu dalam penelitian ini. Adapun terimakasih juga kepada seluruh teman-teman peneliti yang tidak sanggup peneliti sebutkan semua.

Peneliti menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini belum sempurna dan memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut. Oleh karena itu, peneliti mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan dan menjadi referensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya. Mudah-mudahan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi kontribusi positif dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang insyaa Allah bermanfaat bagi umat mukmin.

Banda Aceh, 17 Februari 2026

Peneliti,

Alif Furqan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.4.1 Manfaat Teoritis	3
1.4.2 Manfaat Praktis	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dampak Polusi Udara terhadap Lingkungan dan Makhluk Hidup	5
2.2 Upaya Pemantauan Emisi menggunakan Sensor-Sensor Gas	6
2.3 Karakteristik dan Potensi Karbon Aktif sebagai Media Filtrasi Udara	8
2.4 Konsep IoT untuk Pemantauan Udara	9
2.5 Peran Mikrokontroler dalam IoT	10
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	12
3.1 Rancangan Penelitian	12
3.2 Waktu, Lokasi, dan Objek Penelitian	13
3.3 Alat, Bahan dan Perangkat Lunak Penelitian	13
3.3.1 Alat (<i>Hardware</i>)	13
3.3.2 Bahan	14
3.3.3 Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	14
3.4 Perancangan Prototipe	14
3.5 Proses Pengumpulan Data	17
3.6 Analisis Data	18

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	19
4.1 Penerapan Metode dan Perancangan Sistem	19
4.2 Data Hasil Pengujian Sistem	21
4.3 Analisis Data Hasil Pengujian Sistem	22
4.4 Pembahasan Hasil Pengujian Sistem Secara Keseluruhan	22
4.4.1 Pengujian Sistem Prototipe	22
4.4.2 Respons ENS160 terhadap <i>Threshold</i> eCO ₂	23
4.4.3 Efektivitas Sistem Filtrasi Karbon Aktif	24
4.4.4 Korelasi TVOC dengan Kinerja Sistem	24
4.4.5 Analisis Durasi Filtrasi	25
4.4.6 Keterbatasan Sistem	25
BAB 5 PENUTUP	26
5.1 Kesimpulan	26
5.2 Saran	26
DAFTAR PUSTAKA	27
LAMPIRAN	36

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Sensor NDIR MH-Z19	6
Gambar 2. Sensor SGP40	7
Gambar 3. Sensor ENS160+AHT21	8
Gambar 4. Karbon aktif.....	9
Gambar 5. Cara Kerja <i>Internet of Things</i>	10
Gambar 6. Mikrokontroler Arduino UNO R3	10
Gambar 7. Mikrokontroler ESP32	11
Gambar 8. Diagram Alir Tahapan Riset	12
Gambar 9. Alur Skematik Prototipe	15
Gambar 10. Diagram Alir Algoritma Prototipe	16
Gambar 11. Skema Rangkaian Prototipe	19
Gambar 12. Hasil Nyata Rangkaian Prototipe	20
Gambar 13. Tampilan Grafik eCO ₂ dalam Blynk	20
Gambar 14. Tampilan <i>Gauge</i> eCO ₂ dalam Blynk	20
Gambar 15. Grafik Hasil Uji Konsentrasi Filtrasi Estimasi eCO ₂	22

DAFTAR TABEL

Tabel 1. <i>Rundown</i> Penelitian	13
Tabel 2. Pemetaan koneksi pin komponen pada mikrokontroler ESP32	14
Tabel 3. Data Parameter Uji Sistem Filtrasi	17
Tabel 4. Data Hasil Uji Sistem <i>Monitoring</i> dan <i>Controlling</i>	21



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Komponen Sistem <i>Monitoring</i>	36
Lampiran 2. Komponen Sistem Filtrasi	36
Lampiran 3. Dokumentasi pengujian	37
Lampiran 4. <i>Software</i> Prototipe:	37



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fenomena pencemaran udara akibat peningkatan emisi karbon juga sejalan dengan pandangan Al-Qur'an yang menyebutkan bahwa kerusakan di bumi terjadi akibat perbuatan manusia (QS.Ar-Rūm: 41). Polusi udara merupakan permasalahan lingkungan yang signifikan berada pada ruangan terbuka (*outdoor*) maupun di dalam ruangan tertutup (*indoor*) (Siddique et al., 2025). Polusi udara luar ruangan umumnya berasal dari aktivitas pembakaran terbuka, emisi kendaraan bermotor, serta aktivitas industri (Karri et al., 2024). Sedangkan polusi udara dalam ruangan dipengaruhi oleh asap rokok, penggunaan bahan bakar rumah tangga, dan kurangnya sistem ventilasi yang memadai (Singha R. and Singha S., 2024). Kebijakan nasional Peraturan Pemerintah No. 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan NO.P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2020 tentang Pengendalian Pencemaran Udara telah menetapkan standar ketat untuk mengurangi emisi karbon. Diperlukan upaya mendukung kebijakan nasional dalam pengendalian emisi karbon, mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Ogunkunle et al., 2021; Fadhillah et al., 2025).

Permasalahan utama yang dihadapi adalah tingginya emisi karbon dan partikel berbahaya yang dihasilkan dari aktivitas keseharian seperti asap rokok, yang berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat (Anhar et al., 2022). Di Indonesia, tingginya jumlah perokok aktif menyebabkan peningkatan paparan asap rokok di lingkungan dalam dan luar ruangan. Hal tersebut tidak hanya berdampak pada kesehatan masyarakat, tetapi juga memperburuk kualitas udara dan meningkatkan konsentrasi emisi karbon secara lokal (Sinaga et al., 2024; Dyana et al., 2025). Selain itu, alat pemantauan emisi karbon yang ada saat ini cenderung mahal dan kurang praktis untuk digunakan di sektor UMKM, industri dan perkebunan *indoor* skala menengah dan kecil (Nainggolan et al., 2023; Dimas, 2024). Oleh karena itu, diperlukan solusi inovatif berupa alat pemantauan dan penyaringan emisi karbon berbasis *Internet of Things*

(IoT) yang dapat mengukur kadar emisi secara *real-time* dan menyaring partikel berbahaya secara efisien. *Internet of Things* (IoT) itu sendiri adalah konsep di mana berbagai perangkat fisik dapat saling terhubung melalui jaringan internet untuk mengumpulkan dan bertukar data (Schoder, 2025). IoT memiliki prospek peluang yang sangat tinggi untuk dikembangkan, dan menjadi tren modern yang mampu menciptakan inovasi-inovasi.

Produk komersil umum yang digunakan untuk memantau emisi CO₂ pada lingkungan menggunakan tipe sensor *Non-Dispersive Infrared* (NDIR). Namun, sensor tersebut memiliki harga yang tinggi dan kurang dapat dijangkau oleh masyarakat. Oleh karena itu, dibutuhkannya alternatif dengan biaya yang lebih murah untuk menangani polusi dari emisi CO₂. Penelitian ini berfokus pada perancangan alat alternatif *monitoring* dan *controlling* kualitas udara *indoor* berbasis IoT dalam uji skala kecil yang berpotensi untuk dikembangkan lanjut dan diterapkan pada lokasi *indoor* seperti *cafe*, dan kantor sebagai solusi penanganan polusi udara dalam ruang demi menjaga kesehatan dan kenyamanan manusia.

1.2 Rumusan Masalah

Beberapa permasalahan yang ditinjau dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang sistem *monitoring* dan *controlling* kualitas udara *indoor* berbasis IoT?
2. Bagaimana mengembangkan sistem kendali filtrasi udara *indoor* agar berjalan secara otomatis?
3. Bagaimana evaluasi efektifitas sistem filtrasi karbon aktif terhadap kualitas udara *indoor* dalam mengurangi nilai estimasi eCO₂ dalam ruang uji tertutup?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun penelitian ini memiliki dasar tujuan sebagai berikut.

1. Merancang sistem *monitoring* dan *controlling* kualitas udara *indoor* berbasis IoT menggunakan sensor ENS160 dan mikrokontroler ESP32.
2. Mengembangkan sistem kendali filtrasi udara *indoor* otomatis.

3. Mengevaluasi efektifitas sistem filtrasi karbon aktif terhadap kualitas udara *indoor* dalam mengurangi nilai estimasi eCO₂ dalam ruang uji tertutup.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Teoritis

Adapun manfaat teoritis dalam penelitian ini adalah:

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan khususnya pada bidang instrumentasi dan IoT.
2. Menjadi referensi ilmiah mengenai penerapan sensor gas ENS160 dalam pemantauan kualitas udara *indoor*.
3. Menambah kajian ilmiah mengenai penggunaan media filtrasi karbon aktif untuk menurunkan konsentrasi estimasi ekivalen karbon dioksida (eCO₂) di udara.

1.4.2 Manfaat Praktis

Manfaat praktis dalam penelitian ini dapat ditinjau sebagai berikut:

1. Menghasilkan prototipe *monitoring* dan *controlling* kualitas udara *indoor* berbasis IoT yang dapat digunakan untuk memantau kualitas udara secara *real-time* di lingkungan *indoor*.
2. Mendata nilai estimasi ekivalen karbon dioksida (eCO₂) di udara secara *real-time* melalui sistem *monitoring* berbasis IoT.
3. Membantu mengurangi konsentrasi estimasi eCO₂ di udara melalui sistem filtrasi menggunakan karbon aktif.
4. Menjadi alternatif alat monitoring kualitas udara yang lebih ekonomis dibandingkan perangkat komersial berbasis sensor NDIR.
5. Memberikan solusi teknologi sederhana yang dapat diterapkan pada celah ventilasi ruangan dengan aktivitas manusia tinggi seperti kafe, ruang kerja, atau ruang belajar.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan dalam pemrolehan data. Beberapa batasan tersebut adalah sebagai berikut.

1. Pengujian ini hanya bersifat simulasi laboratorium skala kecil dalam wadah tertutup. Penelitian ini tidak melakukan pengujian pada sektor lokasi *indoor* seperti pada cafeteria ataupun *outdoor* seperti pabrik dan perkebunan.
2. Penelitian ini hanya fokus pada pengukuran estimasi ekivalen gas karbon dioksida (eCO_2) menggunakan sensor ENS160. Senyawa selain CO_2 tidak menjadi objek utama pendataan.
3. Ketersediaan alat komersil seperti *Gas Analyzer* masih belum dapat dijangkau dalam penelitian ini sehingga perbandingan presisi dan kalibrasi data *output* tidak dapat dibandingkan.
4. Sistem filtrasi yang digunakan hanya menggunakan produk karbon aktif konvensional, sehingga spesifikasi persis kandungan karbon aktif tersebut tidak terlalu detail dilampirkan dalam penelitian ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dampak Polusi Udara terhadap Lingkungan dan Makhluk Hidup

Polusi udara merupakan masalah umum yang dapat menyebabkan dampak serius bagi manusia dan lingkungan (Edo et al., 2024; Talaie et al, 2026). Untuk mencegah meluasnya dampak negatif tersebut, upaya pemantauan lingkungan perlu dilakukan secara rutin (Sari et al., 2020; Shetty et al., 2023). Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk batas aman gas CO₂ di dalam ruangan (*indoor*) diatur dalam SNI 03-6572-2001 tentang Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung (Sulaiman and Bhagaskoro, 2023). Konsentrasi CO₂ di udara dalam ruangan memiliki batas aman maksimal sebesar 1.000 ppm berdasarkan standar kualitas udara (Essien and Umoh, 2026). Adapun batas minimal paparan CO₂ di udara yang ideal bagi manusia terletak pada nilai konsentrasi sebesar 400-600 ppm (Bardi et al., 2025; Ayvaz et al., 2026).

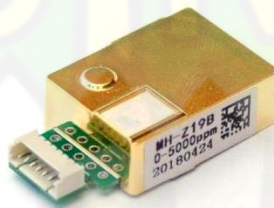
Indonesia menempati urutan teratas di dunia dalam hal jumlah perokok pria dewasa sebanyak 8,8 juta orang (Lulua et al., 2025). Tingginya angka perokok di Indonesia tidak hanya menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon dioksida (Pan et al., 2023). Proses pembakaran rokok menghasilkan CO₂, karbon monoksida (CO), serta partikel halus yang berkontribusi terhadap pencemaran udara dan peningkatan gas rumah kaca (Jadoun et al, 2025).

Keberadaan senyawa organik volatil atau *Volatile Organic Compounds* (VOC) di udara juga turut memengaruhi kualitas udara dan kesehatan manusia (Fazakas et al, 2024). VOC yang berasal dari asap rokok, bahan bakar, cat, maupun proses pembakaran dapat menyebabkan iritasi mata dan saluran pernapasan, sakit kepala, serta gangguan sistem saraf (Shitta and Bharadwaj, 2026; Cho et al, 2026). Kombinasi peningkatan konsentrasi CO₂ dan akumulasi VOC dalam ruang tertutup dapat memperburuk kualitas udara secara signifikan (Baguley et al, 2026). Gejala pada CO₂ dapat ditandai dengan kondisi seseorang

yang mudah pusing ataupun mengantuk (Danek, 2026). Kondisi paparan CO₂ terlalu lama dapat menyebabkan seseorang untuk sesak nafas, pingsan bahkan kematian (Lopez et al., 2023; Karol et al, 2026).

2.2 Upaya Pemantauan Emisi menggunakan Sensor-Sensor Gas

Produk komersil yang digunakan untuk memantau emisi CO₂ pada lingkungan umumnya menggunakan tipe sensor *Non-Dispersive Infrared* (NDIR) (Ma et al, 2024; Ding et al, 2025). Sensor NDIR yang umum digunakan adalah sensor MH-Z19 dan SensiAir S8. Kedua sensor tersebut terbukti akurat dalam mendata kandungan CO₂ di udara. Namun, sensor tersebut memiliki harga yang kurang dapat dijangkau oleh masyarakat. Oleh karena itu, dibutuhkannya alternatif dengan biaya yang lebih murah untuk menangani polusi dari emisi CO₂ (Shahid et al, 2025; Silva et al, 2026).



Gambar 1. Sensor NDIR MH-Z19

Sumber: <https://esphome.io/components/sensor/mhz19/>

Pemantauan emisi karbon telah menjadi fokus penting dalam upaya mengurangi dampak perubahan iklim (Filonchik et al., 2024). Penggunaan sensor gas seperti MQ-135 telah terbukti menjadi alternatif yang murah dan efektif dalam mendeteksi kadar karbon dioksida (CO₂) dan gas lainnya di lingkungan (Agustinur et al., 2023). Sensor ini mampu memberikan data *real-time* akurat, sehingga menjadi opsi komponen favorit dalam sistem pemantauan emisi (Sladojevic et al., 2024).

Tipe sensor gas lain seperti sensor MQ-3 dirancang khusus untuk mendeteksi konsentrasi alkohol (etanol) di udara dengan sensitivitas tinggi (Mei et al., 2024; Verma et al., 2023). MQ-3 tidak spesifik hanya untuk alkohol dan dapat bereaksi terhadap gas lain seperti LPG atau CO dalam konsentrasi tertentu, sehingga diperlukan algoritma pemfilteran data untuk meningkatkan selektivitas

(Al-Okby et al., 2021; Da Silva et al., 2023). Sensor SGP40 merupakan sensor kualitas udara berbasis *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* (CMOS) untuk mendeteksi senyawa organik volatil atau disebut sebagai *Volatile Organic Compounds* (VOC) (Saini et al., 2024).

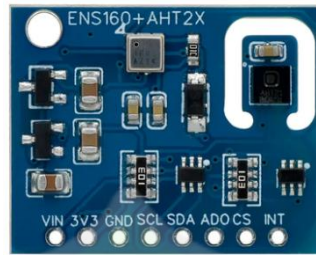


Gambar 2. Sensor SGP40

Sumber: <https://www.electromania.pe/producto/fermion-sensor-de-calidad-del-aire-sgp40/>

SGP40 memiliki sensitivitas deteksi tinggi terhadap berbagai senyawa organik VOC seperti karbon dioksida dari polusi asap, aldehida, dan keton, sehingga juga berpotensi lebih untuk diaplikasikan dalam pemantauan kualitas udara dalam ruangan, sistem ventilasi otomatis, atau perangkat rumah pintar (Yu, Y et al., 2024). Namun, data yang diperoleh dari SGP40 perlu diproses menggunakan algoritma eksternal untuk memperoleh indeks kualitas udara (Robin et al, 2023). SGP40 tidak secara langsung menyediakan parameter eCO_2 maupun AQI bawaan di dalam chip. Sehingga jika ingin mengestimasi kualitas udara atau korelasi terhadap CO_2 , diperlukan pengolahan data tambahan (Chojer et al., 2024).

Sensor ENS160 merupakan sensor kualitas udara berbasis teknologi *Metal Oxide Semiconductor* (MOS) yang dirancang untuk mendeteksi senyawa organik volatil atau *Volatile Organic Compounds* (VOC) dan menghasilkan parameter turunan seperti Total VOC (TVOC), *Air Quality Index* (AQI), serta *equivalent* CO_2 (eCO_2) (Patil et al., 2025; Waqas et al., 2025). Nilai eCO_2 dari pembacaan ENS160 yang dihasilkan bukan merupakan pengukuran langsung konsentrasi karbon dioksida, melainkan estimasi berbasis algoritma internal yang mengkorelasikan kadar VOC dengan aktivitas manusia di dalam ruangan (Chan et al., 2024; Wilson and Yebra, 2024). ENS160 sering dikombinasikan dengan sensor suhu dan kelembaban seperti AHT21.



Gambar 3. Sensor ENS160+AHT21

Sumber: <https://www.instructables.com/ENS160-AHT21-Sensor-for-Arduino/>

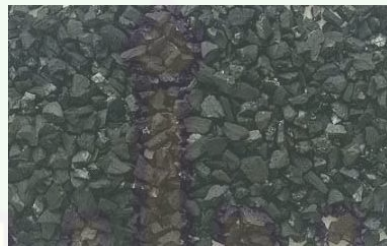
Sensor AHT21 berfungsi mengukur temperatur dan kelembaban relatif udara, yang kemudian digunakan sebagai parameter kompensasi lingkungan karena respons sensor gas MOS sangat dipengaruhi oleh fluktuasi suhu dan kelembaban (Rescio et al., 2023; Abdinoor et al., 2025). Integrasi ENS160 dan AHT21 memungkinkan sistem *monitoring* kualitas udara memperoleh data yang lebih representatif pada kondisi lingkungan *indoor* (Banciu et al., 2024). ENS160 memiliki fitur *Auto-Baseline*, fitur kalibrasi bawaan yang melakukan *reset* otomatis dan menyesuaikan pembacaan setiap kali sensor mendeteksi udara terbersih selama siklus pemantauan dalam kurun waktu 24 jam (Sinahosseini, 2025).

2.3 Karakteristik dan Potensi Karbon Aktif sebagai Media Filtrasi Udara

Teknologi filtrasi emisi karbon juga menjadi aspek penting dalam mengurangi dampak lingkungan (Razek et al., 2025). Sifat karbon aktif banyak digunakan dalam sistem filtrasi udara dan air (Wahyudi, 2022; Gungor et al., 2026). Penggunaan filter karbon aktif dalam sistem filtrasi juga telah terbukti efektif dalam menyaring partikel berbahaya dan gas rumah kaca (Yu, P et al., 2025). Penggunaan karbon aktif dari arang dalam sistem filtrasi emisi karbon mampu diterapkan sebagai solusi untuk mengurangi dampak polusi area tersebut (Menya et al., 2023).

Karbon aktif memiliki ukuran pori yang bervariasi, mulai dari mikropori (kurang dari 2 nm), mesopori (2-50 nm), hingga makropori (lebih dari 50 nm), karbon aktif dapat menangkap partikel dengan ukuran berbeda, termasuk partikel halus seperti debu dan asap (Sidebang et al., 2022; Song et al., 2025). Karbon

aktif yang memiliki banyak rongga pori, dengan luas permukaan mencapai 500-2000 m²/g dan memiliki kemampuan adsorpsi yang terbukti lebih efektif dalam melakukan filtrasi emisi karbon (Ansari et al., 2022; Aravind et al., 2024; Nengsih and Rahman, 2025). Filter karbon aktif bekerja dengan menyerap molekul gas beracun yang terperangkap di dalam pori-pori mikroskopis karbon melalui proses adsorpsi (Tarikuzzaman, 2023; Noraini et al., 2025).



Gambar 4. Karbon aktif

Sumber: <https://www.adywater.com/2014/07/apa-itu-karbon-aktif-karbon-aktif-adalah.html>

Kemampuannya untuk diregenerasi dari kapasitas adsorpsi berpotensi menjadi solusi yang ekonomis dan berkelanjutan, terlebih dalam mengatasi emisi karbon yang terjadi dalam lingkungan (Shah et al., 2023; Khotimah, 2023).

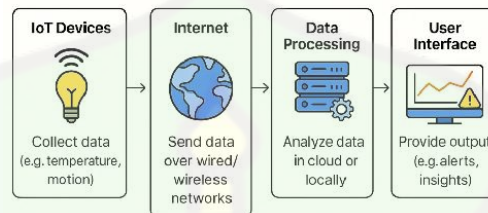
2.4 Konsep IoT untuk Pemantauan Udara

Internet of Things (IoT) merupakan konsep sistem terintegrasi yang menghubungkan perangkat fisik dan perangkat lunak melalui jaringan internet sehingga memungkinkan pertukaran data secara otomatis tanpa intervensi manusia secara langsung (Hudda and Haribabu, 2025; Fachri et al., 2025). Konsep ini memanfaatkan kombinasi sensor, mikrokontroler, jaringan komunikasi, dan *platform* komputasi awan (*cloud computing*) untuk mengumpulkan, menyimpan, mengolah, serta menampilkan data secara *real-time* (Pandey et al., 2025). Dalam pemantauan udara, IoT berperan penting dalam mengintegrasikan sensor kualitas udara dengan sistem pemrosesan dan media transmisi data, sehingga parameter lingkungan seperti konsentrasi gas, suhu, dan kelembaban dapat dipantau secara berkala (Garcia et al., 2025; Kumari et al., 2025).

Sistem IoT umumnya terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu lapisan persepsi yang berfungsi sebagai pengumpul data melalui sensor, lapisan jaringan sebagai media komunikasi data menggunakan teknologi seperti Wi-Fi atau protokol

nirkabel lainnya, serta lapisan aplikasi yang menyediakan antarmuka berupa *dashboard* berbasis web atau perangkat *mobile* untuk visualisasi dan analisis data (Abdulhussain et al., 2025; Hamroun et al., 2025; Lim et al., 2025).

How IoT Works



Gambar 5. Cara Kerja *Internet of Things*

Sumber: <https://iotdunia.com/iot-architecture/>

Implementasi IoT dalam pemantauan udara memberikan berbagai keunggulan, antara lain aksesibilitas data secara jarak jauh, efisiensi operasional, kemampuan penyimpanan historis data untuk analisis tren (Mursyidin et al., 2024), serta sistem peringatan dini apabila parameter kualitas udara melebihi ambang batas yang ditentukan (Miller et al., 2025; Javan et al., 2025).

2.5 Peran Mikrokontroler dalam IoT

Integrasi sensor dengan mikrokontroler memungkinkan pengolahan data secara efisien, yang kemudian dapat digunakan untuk analisis dan pengambilan keputusan (Witczak and Szymoniak, 2024).



Gambar 6. Mikrokontroler Arduino UNO R3

Sumber: <https://www.arduinoindonesia.id/>

Arduino merupakan *platform* mikrokontroler berbasis *open source* yang sangat cocok digunakan dalam pengembangan alat yang mampu memantau, analisa, dan mengumpulkan data (Manoj et al., 2022; Zhao et al., 2022; Tsebesebe et al., 2025). Keunggulan utama Arduino terletak pada kemudahan pemrograman, fleksibilitas

antarmuka dengan berbagai sensor, serta biaya pengembangan yang relatif rendah (Younis et al., 2026).

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *dual-core* dengan fitur Wi-Fi dan Bluetooth bawaan, menjadikannya solusi ideal untuk pengembangan sistem solusi permasalahan modern (Herrera et al., 2025). Keunggulan ESP32 terletak pada kemampuannya menangani pemrosesan data yang lebih kompleks dibandingkan Arduino konvensional, berkat arsitektur *dual-core* dengan *clock speed* hingga 240 MHz (Oliveira et al., 2024). ESP32 juga mendukung berbagai protokol komunikasi seperti MQTT dan HTTP, yang memfasilitasi integrasi dengan server *cloud* atau aplikasi *mobile* (Hasan et al., 2024; Alvarado et al., 2024). Sistem dengan modul IoT seperti ESP32 mampu mengirim data ke platform *cloud*, memungkinkan pemantauan jarak jauh secara digital (Olatomiwa et al., 2023; Uddin et al., 2024; Amanatidis et al., 2025).



Gambar 7. Mikrokontroler ESP32

Sumber: <https://www.arduinoindonesia.id/>

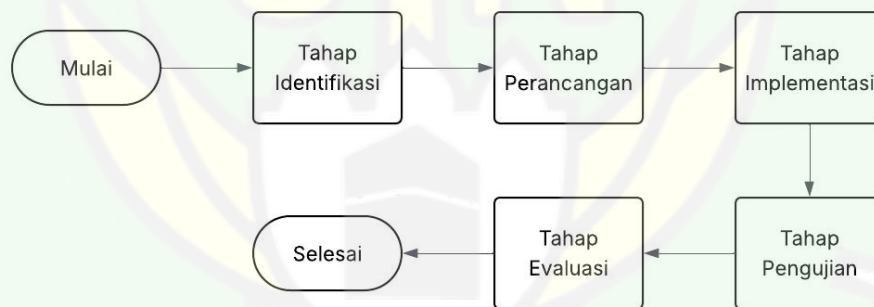
Keandalan ESP32 dalam menangani tugas-tugas *real-time* dan kemampuannya bekerja di lingkungan lapangan yang bervariasi (suhu dan kelembaban) membuatnya menjadi pilihan ideal untuk mengatasi permasalahan modern (Selvam and Al-Humairi, 2023). Selain itu, sistem *Internet of Things* (IoT) telah diadopsi dalam berbagai penelitian untuk memantau kualitas udara secara *real-time* (Narayana et al., 2024).

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode rekayasa eksperimen skala kecil dalam merancang sistem *monitoring* dan *controlling* kualitas udara *indoor*. Adapun dalam sistem perangkat lunak IoT, metode Black Box digunakan untuk mengukur kinerja sistem yang telah dibangun hasil pengujian aplikasi tanpa memprioritaskan struktur kode sistem. Metode *purposive sampling* juga digunakan untuk pemilihan data secara selektif dan terstruktur berdasarkan pertimbangan keterwakilan tren konsentrasi nilai estimasi eCO_2 pada pengujian. Bentuk diagram alir strategi yang diambil dalam penelitian ini dibagi menjadi lima tahapan utama:



Gambar 8. Diagram Alir Tahapan Riset

- 1) **Tahap Identifikasi:** Analisis kebutuhan komponen seperti pada sensor eCO_2 , mikrokontroler, dan media filtrasi.
- 2) **Tahap Perancangan:** Pembuatan desain skema elektronik dan desain sistem filtrasi.
- 3) **Tahap Implementasi:** Perakitan prototipe, pemrograman sistem berbasis IoT, dan integrasi filter karbon.
- 4) **Tahap Pengujian:** Uji akurasi sensor dan efektivitas sistem filtrasi dalam penurunan kadar perkiraan eCO_2 di dalam ruangan tertutup.
- 5) **Tahap Evaluasi:** Menyimpulkan dan memproses hasil data-data yang telah diperoleh.

3.2 Waktu, Lokasi, dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret 2026. Proses perakitan dilakukan di Laboratorium Teknik Fisika UIN Ar-Raniry dan pengujian alat dilakukan dalam wadah kotak tertutup. Objek dari penelitian ini adalah data nilai eCO_2 pada kualitas udara dalam ruang (*indoor*) dengan fokus khusus untuk mengurangi kadar konsentrasi gas eCO_2 .

Tabel 1. *Rundown* Penelitian

No	Jenis Kegiatan	Bulan					
		I	II	III	IV	V	VI
1	Penentuan riset	✓					
2	Penulisan proposal	✓	✓				
3	Seminar proposal			✓			
4	Perancangan alat			✓	✓	✓	
5	Pengujian alat				✓	✓	
6	Pendataan hasil uji				✓	✓	
7	Penulisan skripsi			✓	✓	✓	
8	Sidang skripsi						✓

3.3 Alat, Bahan dan Perangkat Lunak Penelitian

Komponen-komponen yang digunakan guna memenuhi perancangan sistem *monitoring* kualitas udara dengan sistem filtrasi kadar eCO_2 penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.3.1 Alat (*Hardware*)

- Sensor gas ENS160; pendeteksi gas volatil.
- Mikrokontroler ESP32; processor sistem.
- Modul relay; saklar on/off pada aktuator.
- Aktuator Kipas DC 12V; vakum asap.
- *Organic Light Emitting Diode* (OLED); layar tampilan data
- Komponen elektronika (Breadboard dan kabel)
- Adaptor 12V; sumber listrik aktuator.
- Pipa paralon (panjang 10 cm, diameter 12 cm); reka ventilasi udara.
- Kotak kardus kedap udara (75.5 x 50 x 42.5 cm); wadah uji.

3.3.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam sistem filtrasi adalah karbon aktif iodine 1000 tipe mikropori sebanyak 60 g dengan tebal 3 cm sebagai media adsorben untuk mengurangi konsentrasi estimasi $e\text{CO}_2$ di udara. Adapun kain filtrasi dengan bulir berukuran 50 mesh digunakan sebagai pembungkus karbon aktif.

3.3.3 Perangkat Lunak (*Software*)

Instrumen penelitian berupa sistem *monitoring* berbasis IoT yang telah dirancang dan diprogram untuk merekam serta mengirimkan data kualitas udara ke platform IoT Blynk. Antarmuka Blynk juga memiliki fitur untuk melakukan akses *monitoring* jarak jauh. Perangkat lunak yang digunakan dalam pengolahan dan visualisasi program data adalah Arduino IDE.

3.4 Perancangan Prototipe

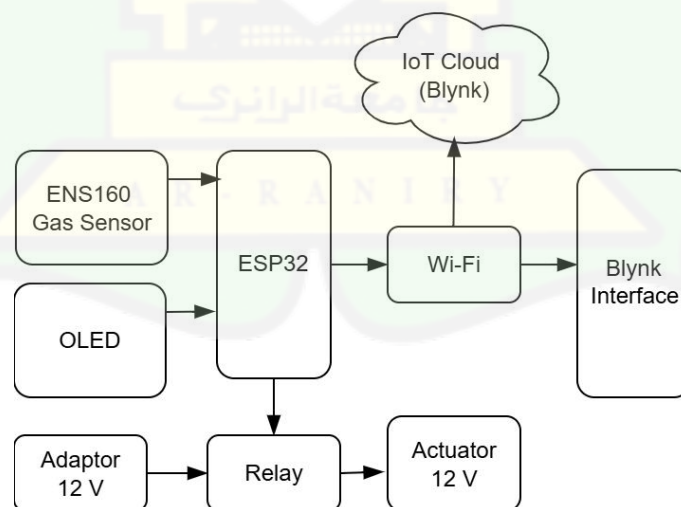
Langkah awal adalah menghubungkan sensor ENS160 ke mikrokontroler ESP32. Data yang ditangkap oleh sensor akan diproses dan dikirim ke *cloud* IoT secara *real-time* yang dapat dimonitor. Udara dalam reka ruangan ditarik menggunakan kipas DC 12V menuju pipa filtrasi yang berisi media karbon aktif. Prosedur ini fokus mengukur kadar estimasi $e\text{CO}_2$ sebelum (*pre-test*) dan sesudah (*post-test*) melewati sistem filtrasi untuk menghitung efisiensi reduksi emisi. Adapun pemetaan elektronik pin komponen pada ESP32 adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Pemetaan koneksi pin komponen pada mikrokontroler ESP32

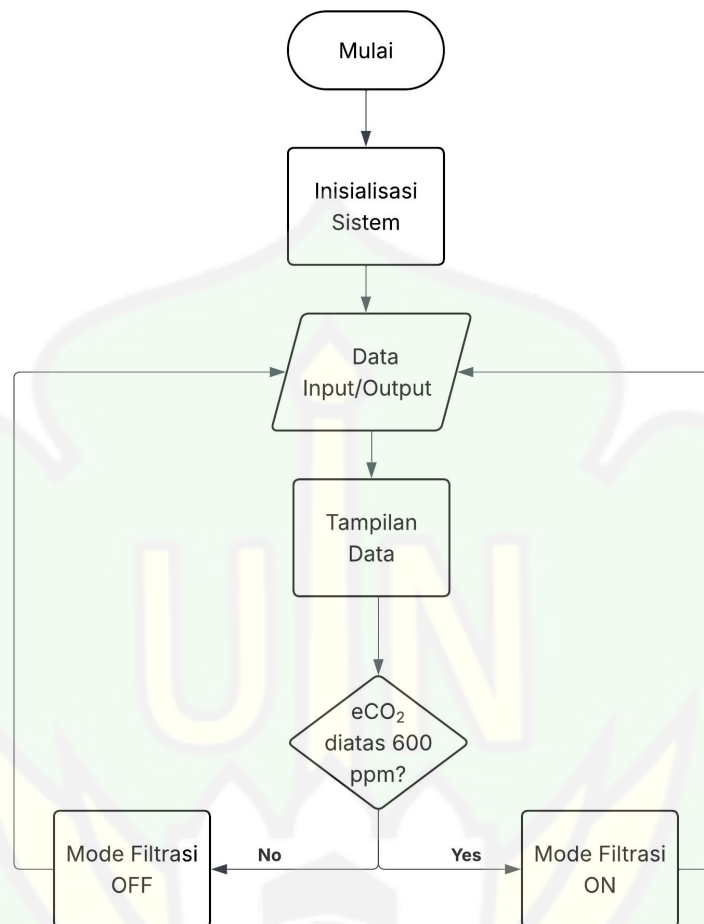
No	Komponen	Pin Komponen	Pin ESP32	Keterangan
1	Sensor ENS160	VCC	3.3 V	Catu daya sensor
		GND	GND	<i>Ground</i> sistem
		SDA	GPIO 21	Jalur data I2C
		SCL	GPIO 22	Jalur clock I2C
2	OLED Display I2C	VCC	3.3 V	Catu daya OLED
		GND	GND	<i>Ground</i>
		SDA	GPIO 21	Jalur data I2C (shared)
		SCL	GPIO 22	Jalur clock I2C (shared)

No	Komponen	Pin Komponen	Pin ESP32	Keterangan
3	Adaptor 12 V	(+)	Koneksi modul relay (NO-1)	Sumber tegangan kipas
		(-)	GND	<i>Grounding</i> kipas
4	Modul Relay (2 Channel)	DC+	5 V	Catu daya positif relay
		DC-	GND	<i>Ground</i>
		IN1	GPIO26	Sinyal kendali kipas
		IN2	GPIO 27	Sinyal kendali relay
5	Kipas DC 12 V	(+)	Koneksi modul relay (COM-1)	Sumber tegangan kipas
		(-)	Koneksi modul relay (NO-1)	<i>Grounding</i> kipas

Skematik 2D dirancang menggunakan aplikasi Cirkuit Designer. Adapun skematik serta alur algoritma kinerja prototipe dapat dilihat pada gambar dan diagram alir masing-masing dibawah ini.



Gambar 9. Alur Skematik Prototipe



Gambar 10. Diagram Alir Algoritma Prototipe

- 1) **Inisialisasi Sistem:** Sistem dalam kondisi aktif dan mengidentifikasi keberadaan tiap komponen melalui koneksi pin yang terhubung dengan ESP32.
- 2) **Data *Input/Output*:** Data dari udara di lingkungan ruang tertutup terbaca oleh sensor gas.
- 3) **Tampilan Data:** Parameter data yang diperoleh tercantum dalam OLED dan *dashboard* Blynk.
- 4) **eCO₂ diatas 600 ppm?:** Logika sistem dalam menentukan aktif atau tidaknya mode filtrasi jika nilai eCO₂ diatas 600 atau dibawah 600 ppm.
- 5) **Mode Filtrasi ON:** Sistem filtrasi aktif saat kandungan eCO₂ di udara bernilai lebih dari 500 ppm dan memfilter eCO₂.
- 6) **Mode Filtrasi OFF:** Sistem filtrasi akan mati saat kandungan eCO₂ di udara bernilai dibawah 600 ppm.

3.5 Proses Pengumpulan Data

Sistem prototipe dimasukkan kedalam media uji menggunakan kotak kardus kedap udara dengan ukuran dimensi panjang 75,5 cm, lebar 50 cm dan tinggi 42,5 cm. Data-data diperoleh melalui logaritma *Serial Monitor* secara *real-time* otomatis yang terintegrasi dengan *platform* IoT Blynk dengan periode 5 kali pengujian. Pengujian berfokus dalam memperhatikan responsifitas aktuator terhadap eCO₂ dan pemrolehan data secara *real-time*. Parameter yang dicatat meliputi waktu pengujian, kadar nilai konsentrasi eCO₂ (ppm), TVOC (ppb), kondisi pengujian, durasi perbedaan perubahan nilai awal dan nilai akhir konsentrasi eCO₂, dan efisiensi dari penurunan kadar konsentrasi eCO₂. Data-data yang diperoleh dari pengujian tersebut akan di-*input* kedalam tabel berikut.

Tabel 3. Data Parameter Uji Sistem Filtrasi

Uji	Waktu (H:M:S)	eCO2 (ppm)	TVOC (ppb)	Kondisi	Durasi Filtrasi (Awal ke Akhir)	Efisiensi eCO2 (%)
1				Awal		
				Tengah		
				Akhir		
2				Awal		
				Tengah		
				Akhir		
3				Awal		
				Tengah		
				Akhir		
4				Awal		
				Tengah		
				Akhir		
5				Awal		
				Tengah		
				Akhir		
Rata-Rata Efisiensi						

3.6 Analisis Data

Dari keseluruhan data yang diperoleh, dilakukan proses simplifikasi menggunakan metode *purposive sampling*, yaitu teknik pemilihan data secara selektif dan terstruktur berdasarkan pertimbangan keterwakilan tren konsentrasi eCO₂ pada masing-masing kondisi pengujian. Data yang telah terkumpul akan diolah menggunakan perangkat lunak Excel. Data yang diproses dalam aplikasi tersebut akan dipresentasikan dalam bentuk grafik garis mengenai fluktuasi kadar eCO₂ guna melihat kondisi kualitas udara. Pengujian efektifitas karbon aktif dilakukan menggunakan bentuk persamaan persentase reduksi untuk membandingkan dan melihat seberapa besar sistem filtrasi mampu menurunkan emisi eCO₂ dalam jangkauan *indoor* keadap udara. Bentuk persamaan dalam menentukan efisiensinya adalah sebagai berikut (Dickson, 2026):

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

Keterangan:

C_{in} = Konsentrasi awal gas sebelum filtrasi aktif.

C_{out} = Konsentrasi gas setelah sistem filtrasi bekerja.

η (eta) = Efisiensi penurunan konsentrasi (%).

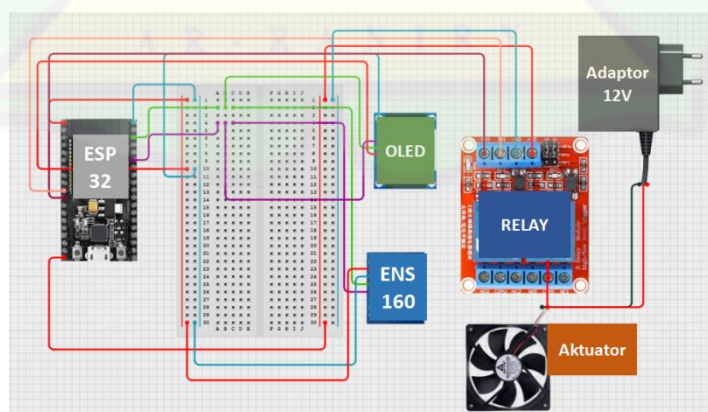
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

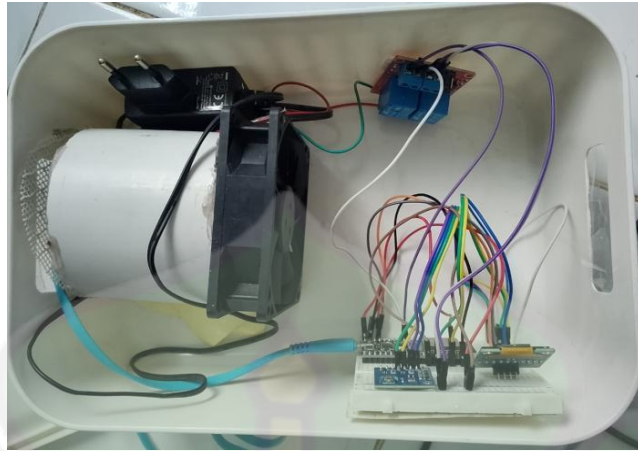
4.1 Penerapan Metode dan Perancangan Sistem

Metode eksperimental yang diterapkan dalam penelitian ini bertujuan untuk melihat kondisi pengurangan nilai eCO_2 dalam udara ruang tertutup rapat. Perancangan sistem *monitoring* kualitas udara diwujudkan dengan mengintegrasikan antara perangkat *input* sensor suhu dan gas *Volatile Organic Compound* (VOC) ENS160 sebagai pendeteksi kadar eCO_2 di udara dengan perangkat pengolah data utama mikrokontroler ESP32. Karbon aktif iodine 1000 digunakan sebagai media filtrasi. Adapun aktuator 12V digunakan untuk membantu menyearahkan kondisi eCO_2 untuk di-adsorpsi oleh media filtrasi.

Eksperimen ini menggunakan wadah kotak kardus kedap udara dengan ukuran dimensi panjang 75,5 cm, lebar 50 cm dan tinggi 42,5 cm. Sistem prototipe dimasukkan kedalam kotak tersebut. Proses pengumpulan data dilakukan dengan dihembuskan asap rokok kedalam celah ventilasi *one-way* kotak uji dalam satu kali hembusan. Kemudian sensor membaca nilai eCO_2 pada asap rokok, dan mengaktifkan aktuator ketika nilai program diatas batas ambang. Pengujian ini berlangsung sebanyak 5 kali pengulangan. Data hasil pengujian yang terbaca pada platform IoT Blynk dianalisa menggunakan metode deskriptif kuantitatif, yakni menyajikan data dalam bentuk tabel dan grafik. Adapun hasil perancangan tersebut divisualisasikan melalui skema rangkaian gambar-gambar berikut.

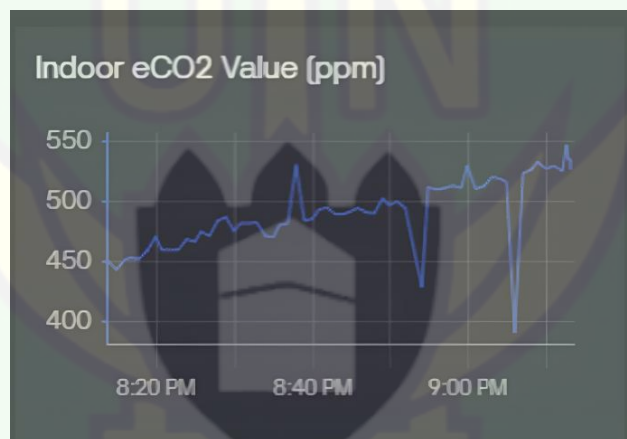


Gambar 11. Skema Rangkaian Prototipe

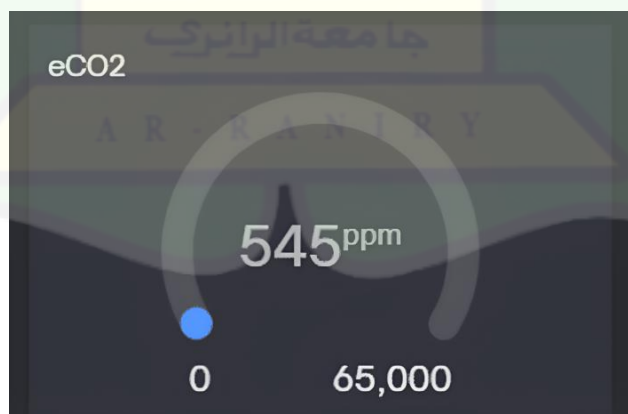


Gambar 12. Hasil Nyata Rangkaian Prototipe

Tampilan data eCO₂ dalam platform IoT Blynk adalah sebagai berikut.



Gambar 13. Tampilan Grafik eCO₂ dalam Blynk



Gambar 14. Tampilan Gauge eCO₂ dalam Blynk

4.2 Data Hasil Pengujian Sistem

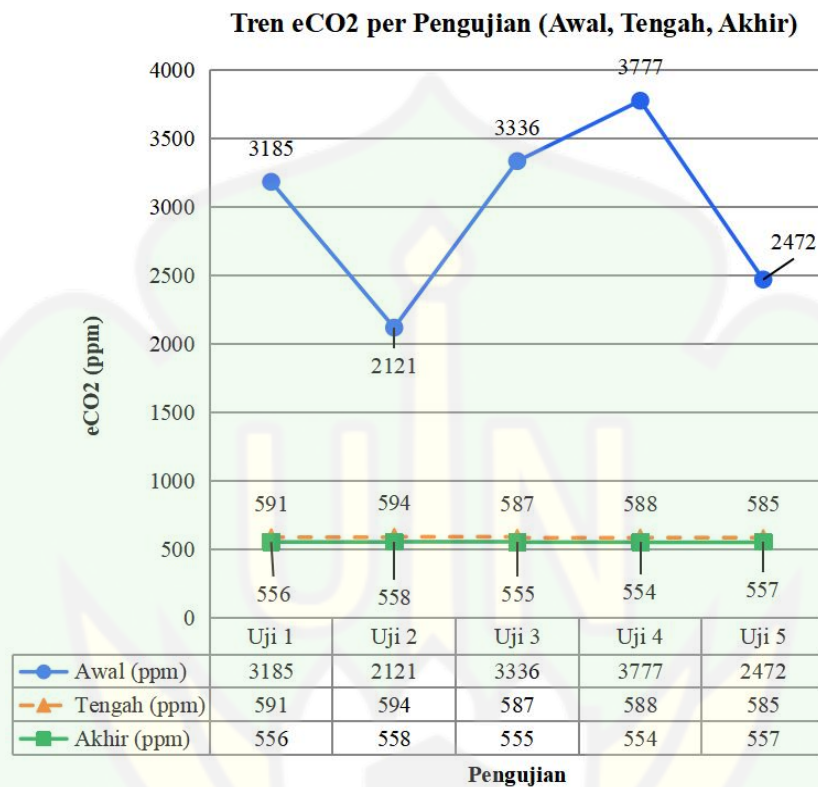
Metode *purposive sampling* digunakan dalam pemilihan data secara selektif dan terstruktur berdasarkan pertimbangan keterwakilan tren konsentrasi nilai estimasi eCO₂ pada masing-masing kondisi pengujian. Data-data yang telah diperoleh dikalkulasikan nilai efisiensinya menggunakan rumus pada subjudul 3.6.

Tabel 4. Data Hasil Uji Sistem *Monitoring* dan *Controlling*

Uji	Waktu (H:M:S)	eCO2 (ppm)	TVOC (ppb)	Kondisi	Durasi Filtrasi (Awal ke Akhir)	Efisiensi eCO2 (%)
1	10:21:54	3185	8961	Awal	24 menit 06 detik	82,54
	10:35:07	591	126	Tengah		
	10:46:00	556	104	Akhir		
2	10:46:08	2121	6220	Awal	17 menit 35 detik	73,69
	10:57:44	594	128	Tengah		
	11:03:43	558	105	Akhir		
3	11:05:43	3336	9320	Awal	13 menit 37 detik	83,36
	11:16:16	587	123	Tengah		
	11:19:20	555	104	Akhir		
4	11:35:17	3777	10343	Awal	16 menit 23 detik	85,33
	11:46:49	588	124	Tengah		
	11:51:40	554	103	Akhir		
5	11:58:14	2472	7170	Awal	12 menit 44 detik	77,47
	12:06:34	585	122	Tengah		
	12:10:58	557	105	Akhir		
Rata-rata Efisiensi						80,48

4.3 Analisis Data Hasil Pengujian Sistem

Berdasarkan data Tabel 4, dapat diperoleh grafik berikut.



Gambar 15. Grafik Hasil Uji Konsentrasi Filtrasi Estimasi eCO₂

4.4 Pembahasan Hasil Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

4.4.1 Pengujian Sistem Prototipe

Secara keseluruhan, sistem *monitoring* dan *controlling* kualitas udara *indoor* berbasis IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini telah berhasil memenuhi tujuan utama penelitian. Sistem mampu mendeteksi kenaikan konsentrasi eCO₂ akibat asap rokok, mengaktifkan aktuator secara otomatis, serta menurunkan konsentrasi eCO₂ dengan efisiensi rata-rata yang cukup tinggi. Sistem *monitoring* berbasis IoT yang dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 berhasil mengirimkan data parameter kualitas udara ke platform Blynk secara konsisten setiap 2 detik. Sensor ENS160 memanfaatkan jumlah TVOC yang terdata dan diproses sehingga memperoleh nilai estimasi eCO₂. Data-data yang terbaca oleh sensor ENS160 ditampilkan secara simultan pada serial monitor,

layar OLED, grafik *real-time* Blynk, serta *gauge* Blynk sebagaimana terlihat pada **Gambar 13** dan **14**. Keberhasilan transmisi data ini membuktikan bahwa integrasi ESP32 dengan protokol komunikasi Wi-Fi mampu mendukung pemantauan udara jarak jauh secara digital.

Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali proses pengulangan dengan menghembuskan asap rokok ke dalam kotak kardus kedap udara berukuran 75,5 x 50 x 42,5 cm sebagai sumber polutan. Pada setiap pengujian, data direkam pada tiga titik waktu yang merepresentasikan tahapan perubahan konsentrasi gas, yaitu:

- 1) Titik Awal; kondisi konsentrasi eCO₂ dan TVOC tertinggi (puncak), tercatat segera setelah asap rokok dihembuskan dan sebelum sistem filtrasi bekerja secara optimal.
- 2) Titik Tengah/Antara; kondisi transisi, yaitu saat konsentrasi gas mulai menurun akibat kerja aktuator filtrasi (kipas DC 12V dan media karbon aktif).
- 3) Titik Akhir; kondisi konsentrasi stabil, yaitu saat nilai eCO₂ dan TVOC mendekati nilai *baseline* udara bersih dalam ruang uji.

Pemilihan tiga titik waktu ini didasarkan pada metode *purposive sampling*, yaitu teknik pengambilan data secara selektif dan terstruktur dengan mempertimbangkan keterwakilan tren konsentrasi gas pada setiap kondisi pengujian, sebagaimana telah dijelaskan pada subjudul 3.5 dan 3.6.

4.4.2 Respons ENS160 terhadap *Threshold* eCO₂

Perlu ditekankan bahwa nilai eCO₂ yang dihasilkan oleh sensor ENS160 bukan merupakan pengukuran langsung konsentrasi karbon dioksida, melainkan estimasi berbasis algoritma internal yang mengkorelasikan kadar VOC dengan aktivitas manusia di dalam ruangan (subjudul 2.2). Nilai eCO₂ awal pada kelima pengujian bervariasi antara 2121–3777 ppm, jauh di atas ambang batas kendali sistem sebesar 600 ppm maupun standar baku mutu udara dalam ruangan menurut SNI 03-6572-2001 yang menetapkan batas aman maksimal 1.000 ppm. Variasi nilai awal ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan intensitas hembusan asap rokok pada tiap pengulangan, yang tidak dapat dikontrol secara seragam meskipun dilakukan dalam satu kali hembusan setiap pengujiannya. Pada titik

tengah, nilai eCO_2 pada seluruh pengujian telah turun secara drastis ke kisaran 585–594 ppm, menunjukkan respons cepat sistem filtrasi begitu nilai melewati ambang aktivasi aktuator. Pada titik akhir, nilai eCO_2 kelima pengujian konvergen pada kisaran sempit 554–558 ppm, mendekati nilai *baseline* sensor ENS160 pada kondisi udara bersih. Konsistensi nilai akhir ini mengindikasikan bahwa sistem filtrasi mampu mengembalikan kondisi udara dalam ruang uji ke tingkat yang aman secara stabil, terlepas dari seberapa tinggi nilai awal eCO_2 yang terdeteksi.

4.4.3 Efektivitas Sistem Filtrasi Karbon Aktif

Efisiensi penurunan eCO_2 pada kelima pengujian berkisar antara 73,69%–85,33%, dengan rata-rata efisiensi keseluruhan sebesar 80,48%. Nilai efisiensi tertinggi diperoleh pada Uji 4 (85,33%), yang juga memiliki konsentrasi eCO_2 awal tertinggi (3777 ppm), sedangkan efisiensi terendah diperoleh pada Uji 2 (73,69%) dengan konsentrasi awal terendah (2121 ppm). Pola ini mengindikasikan bahwa pada konsentrasi awal yang lebih tinggi, selisih absolut penurunan konsentrasi menjadi lebih besar, sehingga nilai efisiensi persentase yang dihasilkan turut lebih tinggi mengingat nilai akhir pada seluruh pengujian relatif konvergen di kisaran 554–558 ppm. Secara keseluruhan, rata-rata efisiensi 80,48% ini menunjukkan bahwa sistem filtrasi karbon aktif mikropori iodine 1000 yang digunakan memiliki efektivitas yang baik dalam menurunkan konsentrasi estimasi eCO_2 pada ruang uji tertutup.

4.4.4 Korelasi TVOC dengan Kinerja Sistem

Nilai TVOC awal berkisar antara 6220–10343 ppb, dengan nilai tertinggi tercatat pada Uji 4 dan nilai terendah pada Uji 2. Pola ini sejalan dengan data eCO_2 , mengingat sensor ENS160 menghasilkan nilai eCO_2 berdasarkan estimasi algoritma internal yang mengkorelasikan kadar VOC terhadap aktivitas di dalam ruangan (sepaimana dijelaskan pada subjudul 2.2). Artinya, lonjakan TVOC akibat asap rokok menjadi basis utama perhitungan nilai eCO_2 yang ditampilkan sensor. Pada titik tengah, nilai TVOC telah turun tajam ke kisaran 122–128 ppb, dan pada titik akhir seluruh pengujian konvergen pada rentang yang sangat sempit, yaitu 103–105 ppb. Konsistensi ini lebih ketat dibandingkan dengan konvergensi

nilai akhir $e\text{CO}_2$, yang mengindikasikan bahwa parameter TVOC memiliki sensitivitas dan stabilitas pembacaan yang baik pada sensor ENS160 setelah proses filtrasi berlangsung.

4.4.5 Analisis Durasi Filtrasi

Durasi yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi stabil bervariasi antara 12 menit 44 detik hingga 24 menit 6 detik. Uji 1 mencatat durasi terlama meskipun nilai $e\text{CO}_2$ awalnya (3185 ppm) bukan yang tertinggi, sedangkan Uji 4 dengan nilai $e\text{CO}_2$ awal tertinggi (3777 ppm) justru memiliki durasi yang lebih singkat (16 menit 23 detik). Hal ini menunjukkan bahwa durasi filtrasi tidak murni berbanding lurus dengan tingginya konsentrasi awal gas, melainkan juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti tingkat kejenuhan sementara media karbon aktif, distribusi aliran udara dari kipas DC 12V menuju pipa filtrasi, serta kondisi *baseline* sensor ENS160 yang dapat menyesuaikan pembacaan melalui fitur *Auto-Baseline* setiap siklus pemantauannya. Secara umum, rentang durasi 12–24 menit ini menunjukkan bahwa sistem filtrasi karbon aktif memiliki respons yang relatif cepat dalam skala ruang uji tertutup berukuran kecil (75,5 x 50 x 42,5 cm), sehingga berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada ventilasi ruangan *indoor* yang lebih besar seperti kafe atau ruang kerja.

4.4.6 Keterbatasan Sistem

Meskipun sistem telah bekerja sesuai tujuan, terdapat beberapa keterbatasan yang menjadi aspek evaluasi. Sensor ENS160 memiliki batas pembacaan maksimal sebesar 65.000 ppm untuk parameter $e\text{CO}_2$. Apabila konsentrasi polutan dalam ruang sangat pekat, sensor akan menghasilkan nilai error dan tidak dapat mempresentasikan nilai pada platform IoT. Tidak tersedianya alat referensi seperti *Gas Analyzer* komersil berbasis sensor NDIR menyebabkan validasi lintas alat tidak dapat dilakukan, sehingga nilai $e\text{CO}_2$ yang dihasilkan oleh ENS160 perlu dipahami sebagai nilai estimasi ekivalen berbasis algoritma internal, bukan pengukuran konsentrasi CO_2 secara langsung.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem monitoring kualitas udara indoor berbasis IoT menggunakan sensor ENS160 dan mikrokontroler ESP32 berhasil dirancang serta mampu menampilkan data eCO₂ secara *real-time* pada platform Blynk. Sistem kendali otomatis berbasis nilai ambang eCO₂ sebesar 600 ppm berhasil mengaktifkan dan menonaktifkan aktuator filtrasi secara otomatis sesuai kondisi udara yang terdeteksi sensor.
2. Aktuator filtrasi aktif secara otomatis ketika nilai eCO₂ terdeteksi melebihi ambang batas 600 ppm, dan menonaktifkannya ketika nilai eCO₂ kembali di bawah ambang tersebut. Hal ini terbukti konsisten pada seluruh lima pengujian, di mana nilai eCO₂ awal yang tinggi (2121–3777 ppm) secara otomatis memicu aktivasi sistem filtrasi tanpa intervensi manual, hingga nilai stabil tercapai.
3. Sistem filtrasi menggunakan karbon aktif mikropori iodine 1000 sebanyak 60 gram yang dibalut dengan kain filtrasi dengan bulir 50 mesh mampu mengurangi konsentrasi eCO₂ dari asap rokok dalam ruang tertutup dengan efisiensi rata-rata sebesar 80,48% sehingga menunjukkan efektifitas yang baik yang terdeteksi oleh sensor.

5.2 Saran

Adapun beberapa rekomendasi untuk penelitian selanjutnya meliputi:

1. Dalam bagian pipa diantara karbon aktif, disarankan untuk menambahkan material spons untuk memaksimalkan proses filtrasi.
2. Jalur antara pipa dan kipas sebaiknya rapat tanpa celah agar memaksimal pengarahannya asap kedalam media filtrasi.
3. Diperlukan pengembangan dalam kendali aktuator dengan menggunakan logika fuzzy untuk menghindari pertukaran mode on-off yang kurang halus.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdinoor, J. A., Hashim, Z. K., Horváth, B., Zsebő, S., Stencinger, D., Hegedüs, G., ... and Kulmány, I. M. (2025). Performance of low-cost air temperature sensors and applied calibration techniques—A systematic review. *Atmosphere*, 16(7), 842.
- Abdulhussain, S. H., Mahmmoud, B. M., Alwhelat, A., Shehada, D., Shihab, Z. I., Mohammed, H. J., ... and Hussain, A. (2025). A comprehensive review of sensor technologies in IOT: Technical aspects, challenges, and future directions. *Computers*, 14(8), 342.
- Agustinur, S. C., Khalifa, K. I., Yantidewi, M., and Deta, U. A. (2023). Literature Review: Air Oxygen Level Monitoring System. *International Journal of Research and Community Empowerment*, 1(2), 62-70.
- Al-Okby, M. F. R., Neubert, S., Roddelkopf, T., and Thurow, K. (2021). Mobile detection and alarming systems for hazardous gases and volatile chemicals in laboratories and industrial locations. *Sensors*, 21(23), 8128.
- Alvarado-Lugo, R. A., Lujan-Leon, J. P., Coaguila, S., Lovon-Ramos, P. W., Obando, L. T., and Campana, J. C. (2024, November). Performance Comparison of AWS IoT Connected Dataloggers in Glacier Environments: Campbell CR1000X vs. ESP32 Open Source. In *2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)* (pp. 1-8). IEEE.
- Amanatidis, P., Lyratzis, E., Angelopoulos, V., Kouloumpiris, E., Skaperdas, E., Bassiliades, N., ... and Karampatzakis, D. (2025). Intelligent Water Management Through Edge-Enabled IoT, AI, and Big Data Technologies. *IoT*, 7(1), 5.
- Anhar, I. P., Mardiana, R., and Sita, R. (2022). Dampak Kebakaran Hutan dan Lahan Gambut Terhadap Manusia dan Lingkungan Hidup (Studi Kasus: Desa Bunsur, Kecamatan Sungai Apit, Kabupaten Siak, Provinsi Riau). *Jurnal Sains Komunikasi dan Pengembangan Masyarakat [JSKPM]*, 6(1).
- Ansari, M. N. M., and Sayem, M. A. (2022). 13 Microwave-assisted activated carbon: A promising class. *Radiation Technologies and Applications in Materials Science*, 331
- Aravind, J., and Kamaraj, M. (Eds.). (2024). *Carbon-based Composites and Nanocomposites: Adsorbents and Membranes for Environmental Remediation*. Walter de Gruyter GmbH and Co KG.
- Ayvaz, C., Alver Şahin, Ü., Yıldız, E., Demirci, Ş., Özcan, K., Uzun Ayvaz, B., ... and Sivri, N. (2026). An overview of CO₂ level as an infection risk proxy for different indoor environments in Istanbul. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 19(1), 14.

- Baguley, D. A., Evans, G. S., Bard, D., Monks, P. S., and Cordell, R. L. (2026). Review of volatile organic compound (VOC) emissions from desktop 3D printers and associated health implications. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 36(1), 149-166.
- Banciu, C., Florea, A., and Bogdan, R. (2024). Monitoring and Predicting Air Quality with IoT Devices. *Processes*, 12(9), 1961. <https://doi.org/10.3390/pr12091961>
- Bardi, U., Bierwirth, P., Huang, K. W., and McIntyre, J. (2025). Carbon dioxide as a pollutant: the risks on human health and the stability of the biosphere. *Environmental Science: Advances*, 4(9), 1364-1372.
- Chan, C. C., Alvi, S. A., Zhou, X., Durrani, S., Wilson, N., and Yebra, M. (2024). A survey on IoT ground sensing systems for early wildfire detection: technologies, challenges, and opportunities. *IEEE Access*, 12, 172785-172819.
- Cho, A. K., Kumagai, Y., and Abiko, Y. (2026). The chemical toxicology of ambient air pollutants. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 66.
- Chojer, H., Branco, P. T. B. S., Martins, F. G., and Sousa, S. I. V. (2024). A novel low-cost sensors system for real-time multipollutant indoor air quality monitoring – Development and performance. *Building and Environment*, 266, 112055. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112055>
- Da Silva Ferreira, M. V., Barbosa, J. L., Kamruzzaman, M., and Barbin, D. F. (2023). Low-cost electronic-nose (LC-e-nose) systems for the evaluation of plantation and fruit crops: recent advances and future trends. *Analytical Methods*, 15(45), 6120-6138.
- Danek, N. (2026). Carbon Dioxide Inhalation—Risks for Health or Opportunity for Physical Fitness Development?. *Journal of Clinical Medicine*, 15(1), 364.
- Dickson, R. (2026, March 9). *Stormwater quality pollutant interactive calculator*. Fircelli Automations. <https://www.fircelliauto.com/en-nl/blogs/calculators/stormwater-quality-pollutant-calculator> (Diakses pada 10 Juni 2026)
- Dimas, H. (2024). *Perancangan Alat Penetralisir Asap Rokok Menggunakan Zeolit dan Karbon Aktif dengan Metode Logika Fuzzy Tsukamoto*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Ding, N., Xi, Y., Jiang, W., Li, H., Su, J., Yang, S., and Lie, T. T. (2025). State-of-the-art carbon metering: Continuous emission monitoring systems for industrial applications. *Heliyon*, 11(3).

- Dyana, J. S., Amelia, R. N., Davita, S. A. M., Arafah, Y. A., Sede, A. I., and Hidayati, A. R. (2025). Dampak Bahaya Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat di Perkotaan. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 11(1. A), 132-140.
- Edo, G. I., Itoje-akpokiniovo, L. O., Obasohan, P., Ikpekoru, V. O., Samuel, P. O., Jikah, A. N., ... and Agbo, J. J. (2024). Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change. *Ecological Frontiers*.
- Essien, E., and Umoh, E. (2026). Reducing Indoor Air Pollution as a Strategy for Mitigating Sick Building Syndrome: A Systematic Prisma-Based Review of Intervention Strategies and Health Outcomes.
- Fachri, M. R., Mursyidin, M., and Hardiko, S. (2025). Desain Sistem IoT untuk Monitoring dan Pengendalian Budidaya Cacing Tanah Berbasis NodeMCU. *Jurnal Riset Teknik Fisika*, 1(2), 57-65.
- Fadhillah, A., Nur, S., Wahid, M., and Aida, N. (2025). Perkiraan Emisi Gas Rumah Kaca pada Sektor Transportasi Menggunakan Perangkat Lunak *Low Emission Analysis Platform* (LEAP) di Kota Banda Aceh Hingga Tahun 2030. *Jurnal Riset Teknik Fisika*, 1(2), 45-56.
- Fazakas, E., Neamtiu, I. A., and Gurzau, E. S. (2024). Health effects of air pollutant mixtures (volatile organic compounds, particulate matter, sulfur and nitrogen oxides)—a review of the literature. *Reviews on Environmental Health*, 39(3), 459-478.
- Filonchik, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V., and He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment*, 173359.
- Garcia, A., Saez, Y., Harris, I., Huang, X., and Collado, E. (2025). Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. *Artificial Intelligence Review*, 58(9), 275.
- Gungor, A., Şentürk, D., Eşkin, D., Aksoy, İ., Kılınç, E. C., and Erdem, E. (2026). Organic Waste-Derived Activated Carbons for Supercapacitor Applications: Advances in Synthesis Strategies and Electrochemical Performance Enhancement. *physica status solidi (a)*, 223(2), e202400992.
- Hamroun, C., Fladenmuller, A., Pariente, M., and Pujolle, G. (2025). Intrusion detection in 5G and Wi-Fi networks: A survey of current methods, challenges and perspectives. *IEEE Access*.

- Hasan, S., Pantha, T., and Arafat, M. A. (2024). Design and development of a cost-effective portable IoT enabled multi-channel physiological signal monitoring system. *Biomedical Engineering Advances*, 100124.
- Herrera, V. A. S., de Araújo, H. P., Penteado, C. G., Gazziro, M., and Carmo, J. P. (2025). Low-Cost Embedded System Applications for Smart Cities. *Big Data and Cognitive Computing*, 9(2), 19.
- Hudda, S., and Haribabu, K. (2025). A review on WSN based resource constrained smart IoT systems. *Discover Internet of things*, 5(1), 56.
- Jadoun, S., Erfani, H., Khodayari, S., Kalantari, F., Fatahi, S., and Gorjizadeh, F. (2025). A Review of Biological Methods for Air Pollution Control and Environmental Sustainability. *Water, Air, and Soil Pollution*, 236(10), 669.
- Javan, F. D., Samadzadegan, F., and Toosi, A. (2025). Air pollution observation—bridging spaceborne to unmanned airborne remote sensing: a systematic review and meta-analysis. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 18(8), 2481-2549.
- Karol, M., Koseska, K., Borowicz, J., Górecki, B., Kloch, K., Romaniuk, P., ... and Bednarczyk, M. (2026). Orthostatic intolerance and presyncopal states in young adults: The role of dehydration, lifestyle, academic stress and autonomic factors—a narrative review. *Journal of Education, Health and Sport*, 87, 67414-67414.
- Karri, R. R., Vera, T., Hassan, S. K. M., Khoder, M. I., Dehghani, M. H., Mubarak, N. M., and Ravindran, G. (2024). Classification, sources, and occurrence of outdoor air pollutants: a comprehensive overview. *Health and Environmental Effects of Ambient Air Pollution*, 1-34.
- Khotimah, N. (2023). Karbon Aktif Berbahan Dasar Limbah Biomassa Pada Aplikasi Penyerapan CO₂ (*Carbon Capture*). In *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)* (Vol. 9, No. 1, pp. 70-77).
- Kumari, S., Choudhury, A., Karki, P., Simon, M., Chowdhry, J., Nandra, A., ... and Garg, M. C. (2025). Next-generation air quality management: unveiling advanced techniques for monitoring and controlling pollution. *Aerosol Science and Engineering*, 1-22.
- Lim, K. S., Ooi, S. Y., Sayeed, M. S., Chew, Y. J., and Ahmad, N. M. (2025). Securing the Internet of Things: Systematic Insights into Architectures, Threats, and Defenses. *Electronics*, 14(20), 3972.
- Lopez, L. R., Dessì, P., Cabrera-Codony, A., Rocha-Melogno, L., Kraakman, B., Naddeo, and Puig, S. (2023). CO₂ in indoor environments: From environmental and health

- risk to potential renewable carbon source. *Science of the total environment*, 856, 159088.
- Lulua, G., Himayani, R., Septiani, L., and Berawi, K. (2025). Tinjauan Pustaka: Kebiasaan Merokok dan Paparan Ultraviolet Sebagai Faktor Risiko Katarak Senilis. *Medical Profession Journal of Lampung*, 14(10), 1968-1972.
- Ma, W., Ji, X., Ding, L., Yang, S. X., Guo, K., and Li, Q. (2024). Automatic monitoring methods for greenhouse and hazardous gases emitted from ruminant production systems: A review. *Sensors*, 24(13), 4423.
- Manoj, M., Dhilip Kumar, V., Arif, M., Bulai, E. R., Bulai, P., and Geman, O. (2022). State of the art techniques for water quality monitoring systems for fish ponds using iot and underwater sensors: A review. *Sensors*, 22(6), 2088.
- Mei, H., Peng, J., Wang, T., Zhou, T., Zhao, H., Zhang, T., and Yang, Z. (2024). Overcoming the limits of cross-sensitivity: pattern recognition methods for chemiresistive gas sensor array. *Nano-micro letters*, 16(1), 269.
- Menya, E., Jjagwe, J., Kalibbala, H. M., Storz, H., and Olupot, P. W. (2023). Progress in deployment of biomass-based activated carbon in point-of-use filters for removal of emerging contaminants from water: a review. *Chemical Engineering Research and Design*, 192, 412-440.
- Miller, T., Durlik, I., Kostecka, E., Kozlovska, P., Łobodzińska, A., Sokołowska, S., and Nowy, A. (2025). Integrating artificial intelligence agents with the internet of things for enhanced environmental monitoring: applications in water quality and climate data. *Electronics*, 14(4), 696.
- Mursyidin, M., Sadrina, S., and Qadri, F. (2024). Quality Analysis Of Internet Of Things-Based Inventory and Lending System Using Iso/Iec 25010. vol, 11, 77-84.
- Nainggolan, H., Nuraini, R., Sepriano, S., Aryasa, I. W. T., Meilin, A., Adhicandra, I., Prayitno, H. (2023). *Green Technology Innovation: Transformasi Teknologi Ramah Lingkungan Berbagai Sektor*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Narayana, T. L., Venkatesh, C., Kiran, A., Kumar, A., Khan, S. B., Almusharraf, A., and Quasim, M. T. (2024). Advances in real time smart monitoring of environmental parameters using IoT and sensors. *Heliyon*, 10(7).
- Nengsih, S., and Rahman, A. (2025). Potensi Arang Aktif dari Ampas Tebu sebagai Media Filter untuk Limbah Cair Rumah Potong Hewan. *Jurnal Riset Teknik Fisika*, 1(1), 16-22.

- Noraini, N. M. R., Zainol, M. M., Alias, A. B., Sulaiman, N. S., Azmir, N. A., Taib, I., ... and Osman, B. (2025). Activated carbon for gas adsorption and its application in gas mask respirator filters: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(7), 6225-6246.
- Nur Ikhwana, H. (2023). *Analisis Green Manufacturing pada Siklus Produksi Batsudan dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA)*. Studi Kasus PT Maruki International Indonesia. Universitas Hasanuddin. Sulawesi Selatan.
- Ogunkunle, O., and Ahmed, N. A. (2021). Overview of Biodiesel Combustion in Mitigating the Adverse Impacts of Engine Emissions on the Sustainable Human–environment Scenario. *Sustainability*, 13(10), 5465.
- Olatomiwa, Lanre, James Garba Ambafi, Umar Suleiman Dauda, Omowunmi Mary Longe, Kufre Esenowo Jack, Idowu Adetona Ayoade, Isah Ndakara Abubakar, and Alabi Kamilu Sanusi (2023). A review of Internet of Things-based visualisation platforms for tracking household carbon footprints. *Sustainability*, 15(20), 15016.
- Oliveira, F., Costa, D. G., Assis, F., and Silva, I. (2024). Internet of Intelligent Things: A convergence of embedded systems, edge computing and machine learning. *Internet of Things*, 101153.
- Pan, Z., Dai, Y., Akar-Ghibril, N., Simpson, J., Ren, H., Zhang, L., ... and Sun, J. L. (2023). Impact of air pollution on atopic dermatitis: a comprehensive review. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, 65(2), 121-135.
- Pandey, S., Chaudhary, M., and Tóth, Z. (2025). An investigation on real-time insights: enhancing process control with IoT-enabled sensor networks. *Discover Internet of Things*, 5(1), 29.
- Patil, A. G., Pramanick, B., and Madhukar, A. (2025). MOS-based gas sensors for monitoring of air pollution: A review. *IEEE Sensors Journal*, 25(6), 9250-9262.
- Razek, M. E. A., Nasr, G. E., Baiomy, M. A., Taieb, A. Z., and Refai, M. (2025). Exhaust emissions gases effects on environmental pollution and processing technologies. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 10(1), 361-376.
- Rescio, G., Manni, A., Caroppo, A., Carluccio, A. M., Siciliano, P., and Leone, A. (2023). Multi-Sensor Platform for Predictive Air Quality Monitoring. *Sensors*, 23(11), 5139.
- Robin, Y., Amann, J., Schneider, T., Schütze, A., and Bur, C. (2023). Comparison of Transfer Learning and Established Calibration Transfer Methods for Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors. *Atmosphere*, 14(7), 1123.

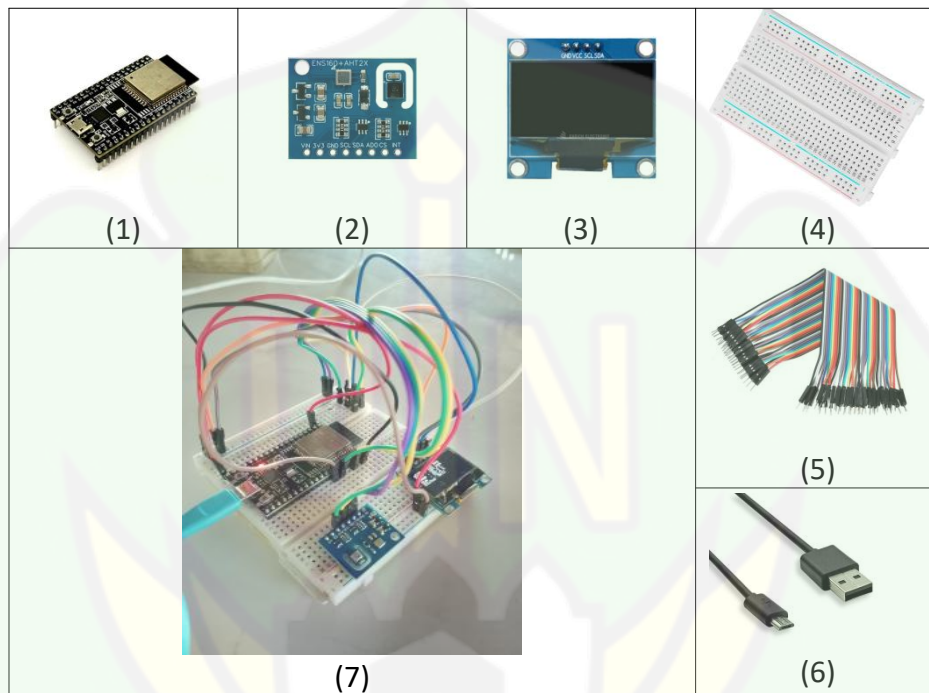
- Saini, J., Dutta, M., and Marques, G. (2024). Robot-assisted indoor air quality monitoring and assessment: a systematic review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-16.
- Sari, Y. W., Darnas Y., AM Hamdan (2020). *Karakterisasi Sifat Magnetik Daun Untuk Analisa Polusi Udara; Sebuah Tinjauan Ulang* (Doctoral dissertation, UPT. Perpustakaan).
- Schoder, D. (2025). Introduction to the Internet of Things. *Internet of things A to Z: technologies and applications*, 1-40.
- Selvam, A. P., and Al-Humairi, S. N. S. (2023). The impact of iot and sensor integration on real-time weather monitoring systems: *A systematic review*.
- Sepahvand, S., Ashori, A., and Jonoobi, M. (2023). Application of cellulose nanofiber as a promising air filter for adsorbing particulate matter and carbon dioxide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 244, 125344.
- Shah, H. H., Amin, M., Pepe, F., Mancusi, E., and Fareed, A. G. (2023). Overview of environmental and economic viability of activated carbons derived from waste biomass for adsorptive water treatment applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-26.
- Shahid, S., Brown, D. J., Wright, P., Khasawneh, A. M., Taylor, B., and Kaiwartya, O. (2025). Innovations in air quality monitoring: sensors, IoT and future research. *Sensors*, 25(7), 2070.
- Shetty, S. S., Deepthi, D., Harshitha, S., Sonkusare, S., Naik, P. B., and Madhyastha, H. (2023). Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon*, 9(9).
- Shitta, J., and Bharadwaj, L. (2026). Microbial volatile organic compounds in indoor air of homes and schools: a scoping review. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 19(1), 5.
- Siddique, A., Al-Shamlan, M. Y., Al-Romaihi, H. E., and Khwaja, H. A. (2025). Beyond the outdoors: indoor air quality guidelines and standards—challenges, inequalities, and the path forward. *Reviews on Environmental Health*, 40(1), 21-35.
- Sidebang, P., Safitri, A., Tarafannur, R. M. S., Said, A., Mafud, N. K., and Lahe, G. M. (2022). Sistem Filtering Berbahan Daun Mangga Untuk Emisi Partikulat Matter_{2.5}. *Jurnal Kesmas Jambi*, 6(1).
- Silva, G., Duarte, J., Baptista, J. S., and Rufo, J. C. (2026). Low-cost sensors for indoor air quality monitoring: A systematic Review of accuracy, applications, and limitations. *Journal of the Air and Waste Management Association*, (just-accepted).

- Sinaga, V. S. E., Siahaan, P. G., Purba, N. R., Adilla, A., Harahap, A. P., ... and Tarigan, P. S. B. (2024). Analisis Persepsi Mahasiswa Terhadap Kawasan Tanpa Rokok Sebagai Manifestasi Hak Atas Kesehatan (Studi Kasus: Mahasiswa Pendidikan Biologi Kelas A). *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(6), 6654-6668.
- Sinahosseini. (2025). Micropython-ens160-aht21: *MicroPython driver for ENS160+AHT21 environmental sensor module on Raspberry Pi Pico*. <https://github.com/SinaHosseini7/micropython-ens160-aht21> (Diakses pada 8 Juni 2026)
- Singha, R., and Singha, S. (2024). Indoor Air Pollution: Causes, Effects, And Solutions. *Effects, And Solutions* (November 25, 2024).
- Sladojevic, S., Arsenovic, M., Nikolic, D., Anderla, A., and Stefanovic, D. (2024). Advancements in Mobile-Based Air Pollution Detection: From Literature Review to Practical Implementation. *Journal of Sensors*, 2024(1), 4895068.
- Song, Y., Yuan, Y., and Zhu, J. (2025). A review on applications of fine particles integrated with fluidization technologies. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103(4), 1474-1493.
- Sulaiman S, Bhagaskoro. (2023). *Evaluasi Kondisi Kualitas Udara dalam Ruangan Perpustakaan Kampus UMN sebagai Upaya untuk Menghadapi Era Kenormalan Baru (Studi Kasus Kawasan Kampus Universitas Multimedia Nusantara, Perpustakaan Lantai 1)*. Bachelor Thesis, Universitas Multimedia Nusantara.
- Talaie, A., Fulazzaky, M. A., Rezania, S., and Tamadon, A. (2026). Adsorption, catalytic oxidation, and phytoremediation for air pollution control: a comprehensive review. *Environmental Science: Atmospheres*.
- Tarikuzzaman, M. (2023). A review on activated carbon: Synthesis, properties, and applications. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 10(1), 114-123.
- Tsebesebe, N. T., Mpofu, K., Sivarasu, S., and Mthunzi-Kufa, P. (2025). Arduino-based devices in healthcare and environmental monitoring. *Discover Internet of Things*, 5(1), 46.
- Uddin, Raihan, and Koo, I. (2024). Real-time remote patient monitoring: a review of biosensors integrated with multi-hop IoT systems via cloud connectivity. *Applied Sciences*, 14(5), 1876.

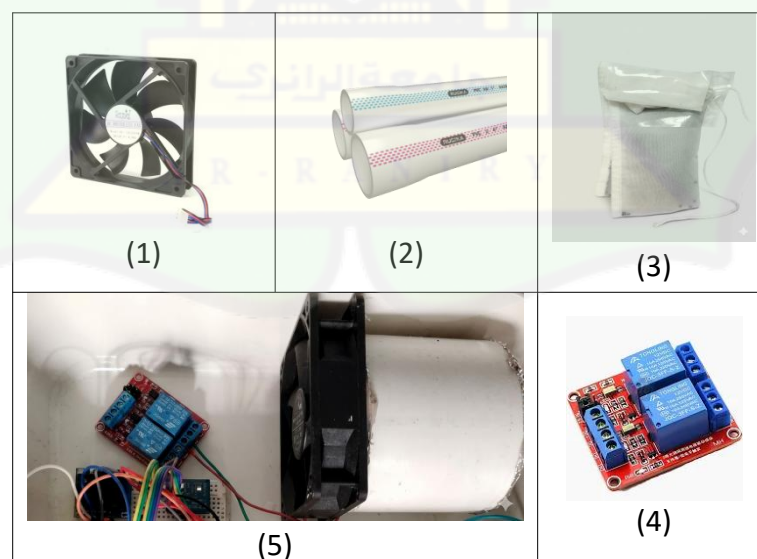
- Verma, G., Gokarna, A., Kadiri, H., Nomenyo, K., Lerondel, G., and Gupta, A. (2023). Multiplexed gas sensor: fabrication strategies, recent progress, and challenges. *ACS sensors*, 8(9), 3320-3337.
- Wahyudi, R. (2022). *Pengaruh Penggunaan Filtrasi “Kelara” Terhadap Penurunan Kadar Surfaktan Air Limbah Cuci Tangan pada Wastafel Poltekkes Kemenkes Yogyakarta*. Doctoral dissertation. Poltekkes Kemenkes Yogyakarta.
- Waqas Alam, M., Sharma, A., Kumar, S., Mohammad Junaid, P., and Awad, M. (2025). VOC detection with zinc oxide gas sensors: a review of fabrication, performance, and emerging applications. *Electroanalysis*, 37(1), e202400246.
- Wilson, N., and Yebra, M. (2024). A Survey on IoT Ground Sensing Systems for Early Wildfire Detection: Technologies, Challenges, and Opportunities.
- Witczak, D., and Szymoniak, S. (2024). Review of Monitoring and Control Systems Based on Internet of Things. *Applied Sciences*, 14(19), 8943.
- Younis, B. A., Almkhtar, H. D., and Issa, B. A. (2026). Low-Cost Hardware-in-the-Loop Simulation: A Literature Review. *Applied Mechanics & Materials*, 934, 75-88.
- Yu, Y., Gola, M., Settimo, G., Buffoli, M., and Capolongo, S. (2024). Feasibility and Affordability of Low-Cost Air Sensors with Internet of Things for Indoor Air Quality Monitoring in Residential Buildings: Systematic Review on Sensor Information and Residential Applications, with Experience-Based Discussions. *Atmosphere*, 15(10), 1170.
- Yu, P., Baker, M. C., Taslakyian, L., Strawn, D. G., and Möller, G. (2025). Reactive Filtration Water Treatment: A Retrospective Review of Sustainable Sand Filtration Re-Engineered for Advanced Nutrient Removal and Recovery, Micropollutant Destructive Removal, and Net-Negative CO₂e Emissions with Biochar. *Sustainability*, 17(13), 5799.
- Zhao, L., Yang, Y., and Wu, Z. (2022). Review of Communication Technology in Indoor Air Quality Monitoring System and Challenges. *Electronics*, 11(18), 2926.

LAMPIRAN

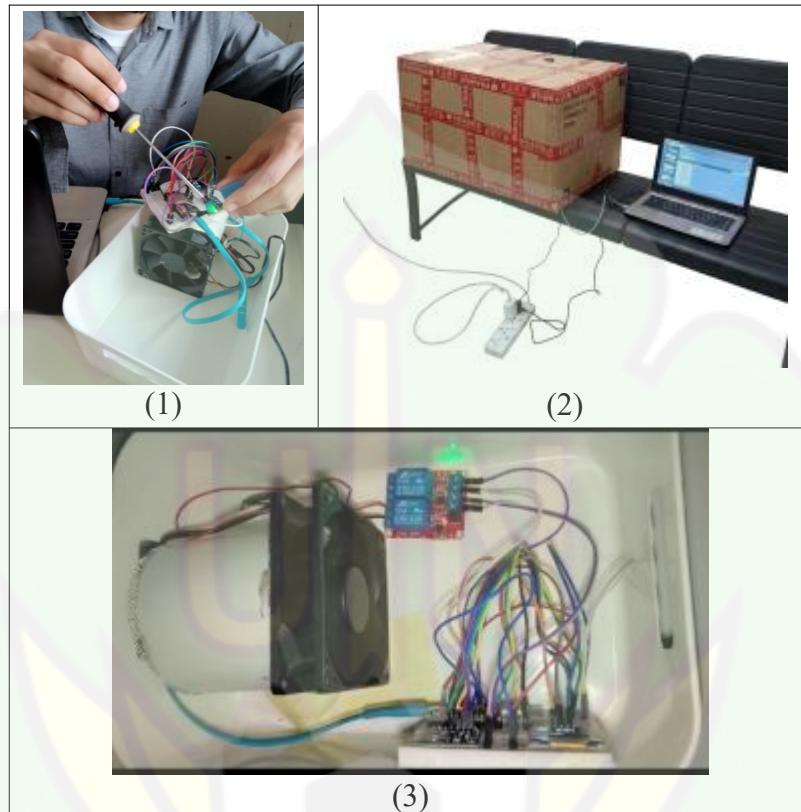
Lampiran 1. Komponen Sistem *Monitoring*: (1) ESP32; (2) ENS160; (3) OLED; (4) Breadboard; (5) Kabel Jumper; (6) Kabel USB ke Micro USB; (7) Hasil Rangkaian.



Lampiran 2. Komponen Sistem Filtrasi: (1) Kipas DC 12V; (2) Pipa Paralon; (3) Karbon aktif dalam kain filtrasi; (4) Modul Relay Dual Channel; (5) Hasil Rangkaian



Lampiran 3. Dokumentasi pengujian: (1) Konfigurasi pin relay; (2) Proses Pengujian; (3)
Tampak keseluruhan alat



Lampiran 4. *Software* Prototipe:

- (1) Kode program: <https://github.com/alipfurqan09/220714009>
- (2) Arduino IDE: <https://docs.arduino.cc/software/ide/>
- (3) Cirkuit Designer: <https://www.cirkitdesigner.com/>
- (4) Draw.io: <https://app.diagrams.net/>
- (5) Blynk: <https://sgp1.blynk.cloud/dashboard/1064919/global/devices/287910/organization/1064919/devices/4009910/dashboard>