

Sistem Kontrol Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis Arduino

Derik Dwi Heavyanto^{1*}, Yudi Kristyawan², Budi Santoso³

^{1,2,3}Fakultas Teknik, Teknik Informatika, Universitas Dr. Soetomo, Surabaya, Indonesia
E-mail: ^{1*}hgiyant@gmail.com, ²yudi.kristyawan@unitomo.ac.id, ³budi.santoso@unitomo.ac.id
(* : corresponding author)

Abstrak

Permasalahan kualitas udara dalam ruangan semakin meningkat seiring tingginya paparan polutan seperti karbon monoksida (CO) dan partikulat PM2.5, khususnya pada bangunan yang berada di dekat jalan raya. Sebagian besar perangkat pengendalian udara masih dioperasikan secara manual atau terus-menerus tanpa mempertimbangkan kondisi aktual, sehingga tidak efisien dan kurang responsif terhadap perubahan kualitas udara. Penelitian ini merancang sistem kontrol kualitas udara berbasis Arduino yang mampu melakukan pemantauan *real-time* dan pengendalian otomatis menggunakan sensor MQ-7, PMS5003, dan PIR. Metode yang digunakan adalah pendekatan prototipe yang meliputi perancangan perangkat keras, pemrograman mikrokontroler, serta pengujian fungsi sistem menggunakan *black box testing*. Skenario pengujian mencakup kondisi kadar CO dan PM2.5 melampaui ambang batas, deteksi keberadaan manusia, serta kombinasi seluruh parameter pada dua ruangan uji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merespons seluruh skenario dengan baik, di mana exhaust fan aktif sesuai dengan logika kendali yang telah ditetapkan. Berdasarkan analisis hasil pengujian, sistem mencapai tingkat keberhasilan sebesar 100% dari seluruh skenario yang diuji, serta mampu menampilkan informasi kualitas udara secara *real-time* melalui LCD. Penelitian ini membuktikan bahwa sistem kontrol berbasis Arduino dapat bekerja efektif dalam menjaga kualitas udara ruangan secara otomatis dan menjadi solusi yang mudah diterapkan.

Kata kunci: Kualitas Udara, Kontrol Otomatis, Arduino, MQ-7, PMS5003

Abstract

Indoor air quality issues are increasing due to high exposure to pollutants such as carbon monoxide (CO) and PM2.5 particulates, especially in buildings located near highways. Most air control devices are still operated manually or continuously without considering actual conditions, making them inefficient and unresponsive to changes in air quality. This study designed an Arduino-based air quality control system capable of real-time monitoring and automatic control using MQ-7, PMS5003, and PIR sensors. The method employed was a prototype approach that included hardware design, microcontroller programming, and system function testing using black-box testing. The testing scenarios included conditions where CO and PM2.5 levels exceeded thresholds, human presence detection, and a combination of all parameters in two test rooms. The test results showed that the system was able to respond well to all scenarios, with the exhaust fan activating according to the predetermined control logic. Based on the analysis of the test results, the system achieved a 100% success rate in all scenarios tested and was able to display real-time air quality information via LCD. This study proves that the Arduino-based control system can work effectively in automatically maintaining indoor air quality and is an easy-to-implement solution.

Keywords: Air Quality, Automatic Control, Arduino, MQ-7, PMS5003

1. PENDAHULUAN

Udara merupakan komponen vital dalam kehidupan sehari-hari karena menjadi kebutuhan mendasar yang menunjang keberlangsungan hidup manusia maupun makhluk hidup lainnya [1]. Namun, kualitas udara di bangunan yang berada di dekat jalan raya cenderung lebih buruk akibat tingginya konsentrasi polutan seperti karbon monoksida (CO) dan PM2.5 [2]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa paparan polutan di dalam ruangan dapat menimbulkan dampak kesehatan baik jangka pendek maupun jangka panjang, dan dalam beberapa kasus konsentrasinya bahkan dapat mencapai 2–10 kali lebih tinggi dibandingkan udara luar [3]. Kondisi ini menjadi semakin penting mengingat masyarakat menghabiskan 80–90% waktunya di dalam ruangan seperti rumah dan kantor [4], [5]. Oleh karena itu, sistem pengelolaan kualitas udara yang mampu memantau kondisi secara *real-time* sekaligus melakukan pengendalian otomatis diperlukan untuk menjaga kesehatan dan kenyamanan penghuni [6], [7].

Permasalahan utama dalam pengelolaan kualitas udara dalam ruangan adalah penggunaan perangkat seperti exhaust fan yang sering dioperasikan terus-menerus tanpa mempertimbangkan

kondisi udara aktual. Penggunaan berlebih ini tidak hanya boros energi, tetapi juga tidak efisien dalam menjangkau ruangan yang lebih luas, di mana satu perangkat sering kali tidak cukup untuk mendistribusikan pembersihan udara secara merata. Selain itu, sebagian besar bangunan belum memiliki sistem pemantauan dan kontrol kualitas udara *real-time*, sehingga penghuni kesulitan mengetahui kapan kualitas udara menurun dan kapan tindakan korektif harus dilakukan [8].

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara dengan parameter CO, CO₂, PM2.5, suhu, dan kelembaban menggunakan platform seperti NodeMCU, Wemos D1, dan Arduino Uno [3], [9], [10]. Studi lain menggunakan sensor MQ-135 dan MQ-136 untuk mendeteksi polutan seperti CO dan SO₂ [11]. Penelitian berbasis protokol MQTT juga telah memfasilitasi pengiriman data ke platform seperti Thingspeak dilengkapi tampilan *real-time* melalui LCD [12], [13]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya berfokus pada pemantauan kualitas udara tanpa mengintegrasikan fungsi pengendalian perangkat pendukung secara otomatis.

Beberapa penelitian mulai mengarah pada sistem kontrol otomatis, misalnya pengaktifan exhaust fan berbasis ESP32 dan sensor lingkungan pada area merokok [14]. Meskipun demikian, penelitian tersebut masih terbatas pada pengendalian satu perangkat dalam satu titik ruangan, sehingga belum mampu menangani kondisi ruangan yang lebih luas dan membutuhkan koordinasi beberapa perangkat sekaligus.

Berdasarkan *gap* pada penelitian terdahulu, penelitian ini mengembangkan sistem kontrol kualitas udara dalam ruangan berbasis Arduino yang tidak hanya memantau kondisi udara secara *real-time*, tetapi juga mampu mengendalikan beberapa perangkat seperti exhaust fan secara otomatis ketika kualitas udara memburuk. Sistem dirancang untuk bekerja pada beberapa titik dalam satu ruangan sehingga pengendalian kualitas udara dapat dilakukan secara lebih merata. Penelitian ini memanfaatkan parameter CO dan PM2.5 sebagai indikator kualitas udara dan menggunakan data pengamatan langsung dari beberapa ruang tertutup seperti kamar tidur dan ruang tamu. Arduino dipilih karena fleksibel, mudah diintegrasikan dengan sensor, serta memiliki biaya implementasi yang ekonomis [15].

Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem kualitas udara yang tidak hanya melakukan pemantauan, tetapi juga menyediakan mekanisme kontrol multi-perangkat secara otomatis. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan kualitas udara dalam ruangan sekaligus memberikan solusi yang dapat diakses oleh masyarakat luas.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode prototipe, yang memungkinkan pengembangan sistem dilakukan secara bertahap melalui pembuatan model awal, pengujian, dan penyempurnaan hingga diperoleh sistem yang berfungsi sesuai kebutuhan [16]. Tahapan penelitian dijelaskan sebagai berikut.

2.1. Analisis Kebutuhan Sistem

Tahap ini dilakukan untuk menentukan komponen yang diperlukan dalam membangun sistem pemantauan dan pengendalian kualitas udara. Kebutuhan perangkat keras meliputi sensor MQ-7 untuk mendeteksi CO, sensor PMS5003 untuk mengukur konsentrasi PM2.5, sensor PIR untuk mendeteksi keberadaan manusia, mikrokontroler Arduino Mega sebagai pengendali, serta exhaust fan sebagai aktuator pembersih udara. Daftar lengkap perangkat keras yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1, yang memuat seluruh komponen utama yang diperlukan untuk membangun prototipe sistem.

Selain perangkat keras, kebutuhan perangkat lunak juga ditentukan untuk mendukung proses pemrograman dan pengoperasian mikrokontroler. Pada penelitian ini, perangkat lunak yang digunakan yaitu Arduino IDE, yang berfungsi untuk menulis, mengunggah, dan memantau program yang dijalankan pada Arduino. Analisis kebutuhan ini mempertimbangkan skenario multi-ruangan, sehingga sistem dirancang untuk dapat bekerja secara independen pada setiap ruangan dalam melakukan pemantauan dan pengendalian kualitas udara.

Tabel 1. Kebutuhan Komponen Perangkat Keras

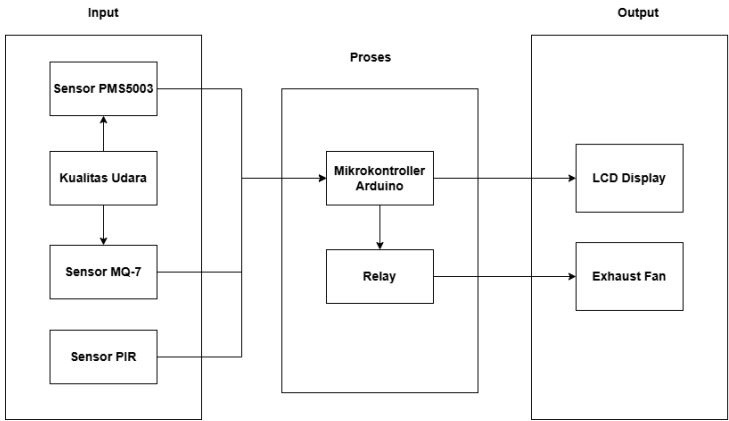
No	Komponen	Fungsi
1	Arduino Mega 2560	Berfungsi sebagai mikrokontroler utama
2	Sensor MQ-7	Berfungsi untuk mendeteksi kadar CO
3	Sensor PMS5003	Berfungsi untuk mendeteksi PM2.5
4	Sensor PIR	Deteksi keberadaan manusia
5	Modul Relay	Mengaktifkan exhaust fan
6	Exhaust Fan	Pembersih udara
7	Power Supply 5V & 12V	Sumber daya sistem 5V untuk Arduino & sensor, 12V untuk exhaust fan
8	Papan Dot (Stripboard / Veroboard)	Sebagai terminal distribusi power untuk membagi jalur 5V, GND, dan jalur sensor dengan rapi
9	Kabel jumper & konektor	Penghubung rangkaian
10	LCD 1602 I2C	Menampilkan informasi kualitas udara

2.2. Desain Sistem

Desain sistem pada penelitian ini mencakup tiga bagian utama, yaitu blok diagram, arsitektur sistem, dan flowchart. Ketiga elemen ini disusun untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai mekanisme kerja sistem kontrol kualitas udara yang dikembangkan.

a. Blok Diagram

Blok diagram pada Gambar 1 digunakan sebagai dasar pemahaman mengenai bagaimana sistem kontrol kualitas udara dirancang untuk bekerja secara terstruktur. Representasi ini tidak hanya menunjukkan hubungan antar komponen, tetapi juga memberikan gambaran menyeluruh mengenai aliran informasi dari tahap pendeteksian hingga pengambilan keputusan. Dengan adanya blok diagram, setiap fungsi utama dalam sistem dapat divisualisasikan sehingga memudahkan proses implementasi dan verifikasi rancangan.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Kontrol Kualitas Udara

Pada bagian input, terdapat tiga jenis sensor utama yang digunakan untuk menangkap kondisi lingkungan secara *real-time*, yaitu Sensor PIR untuk mendeteksi keberadaan manusia, Sensor MQ-7 untuk mengukur konsentrasi karbon monoksida (CO), serta Sensor PMS5003 untuk mendeteksi kadar PM2.5. Ketiga sensor ini berfungsi sebagai sumber data awal yang akan menentukan keadaan kualitas udara di dalam ruangan.

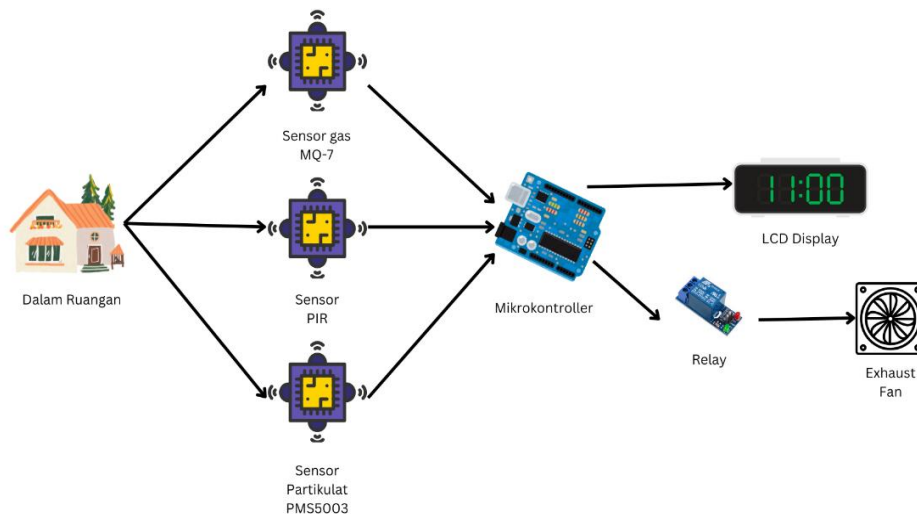
Seluruh data dari sensor kemudian dikirimkan ke mikrokontroler Arduino sebagai pusat pemrosesan. Arduino membaca nilai CO dan PM2.5 serta memeriksa apakah nilainya telah melampaui ambang batas kualitas udara yang ditetapkan. Informasi dari sensor PIR juga digunakan untuk memastikan bahwa tindakan pengendalian hanya dilakukan saat ruangan terdeteksi sedang digunakan. Jika kondisi dianggap tidak aman, Arduino mengaktifkan modul relay untuk menyalakan exhaust fan sebagai respons pengendalian.

Pada bagian output, sistem menampilkan informasi kualitas udara melalui LCD Display untuk memberikan pemantauan visual secara langsung kepada pengguna. Bersamaan dengan itu, exhaust fan diaktifkan oleh relay untuk membuang udara tercemar keluar ruangan hingga kualitas udara kembali ke kondisi aman. Dengan alur kerja tersebut, blok diagram pada Gambar 1

menggambarkan sistem yang bekerja secara otomatis, responsif, dan efisien dalam menjaga kualitas udara ruangan.

b. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem pada Gambar 2 menunjukkan struktur utama dari rancangan prototipe yang mengintegrasikan sensor MQ-7, PMS5003, dan PIR sebagai unit akuisisi data yang dipasang di dalam ruangan, kemudian seluruh data sensor dikirimkan menuju mikrokontroler Arduino Mega sebagai pusat pengolahan. Mikrokontroler selanjutnya meneruskan instruksi ke modul relay untuk mengendalikan exhaust fan serta menampilkan informasi kualitas udara pada LCD Display. Representasi ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai keterhubungan antarmodul dan pembagian fungsi setiap komponen, sehingga memastikan sistem dapat beroperasi secara modular dan independen pada tiap ruangan dalam skenario multi-kontrol.



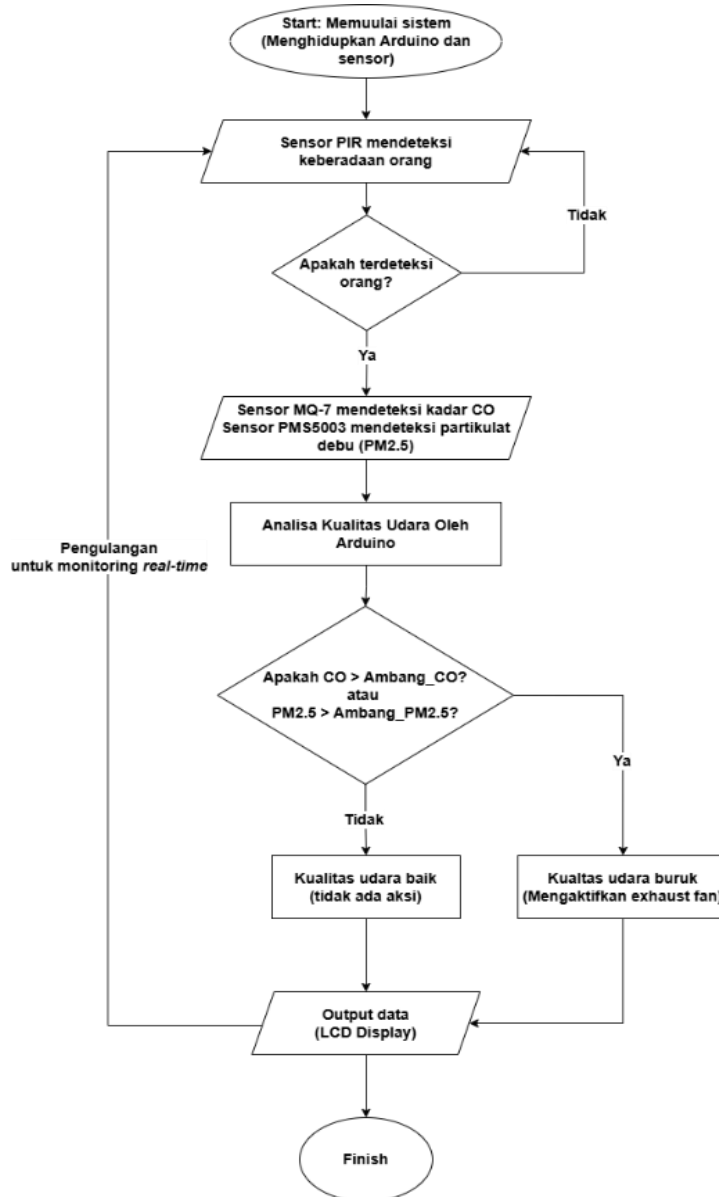
Gambar 2. Arsitektur Sistem

c. Diagram Alir

Diagram alir berfungsi sebagai panduan logis yang menggambarkan alur pengambilan keputusan di dalam sistem, mulai dari proses pembacaan sensor, evaluasi kondisi kualitas udara, hingga tindakan pengendalian yang dilakukan oleh perangkat. Dengan adanya diagram alir, seluruh proses internal yang tidak terlihat secara fisik dapat dijelaskan secara sistematis, sehingga memudahkan proses implementasi, validasi, serta memastikan bahwa setiap langkah operasional berjalan sesuai dengan logika yang telah dirancang. Diagram ini juga penting untuk menunjukkan bagaimana sistem bereaksi dalam berbagai kondisi udara, khususnya pada skenario multi-ruangan di mana respons otomatis harus tetap konsisten meskipun diterapkan pada konfigurasi perangkat yang berbeda.

Diagram alir pada Gambar 3 memperlihatkan tahapan operasional dimulai dari inisialisasi sistem dan pengaktifan seluruh modul sensor. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan kadar karbon monoksida dari sensor MQ-7, konsentrasi partikulat PM2.5 dari sensor PMS5003, serta mendeteksi keberadaan manusia menggunakan sensor PIR. Nilai yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan ambang batas yang telah ditentukan untuk menentukan apakah kondisi udara berada pada tingkat aman atau berpotensi membahayakan penghuni. Jika salah satu parameter kualitas udara (CO atau PM2.5) melebihi nilai ambang batas dan sensor PIR menunjukkan adanya manusia di dalam ruangan, maka sistem mengirimkan sinyal ke modul relay untuk mengaktifkan exhaust fan. Sebaliknya, apabila kondisi udara berada dalam batas aman atau ruangan tidak terdeteksi berpenghuni, exhaust fan tetap berada pada kondisi non-aktif untuk menghindari penggunaan energi yang tidak perlu. Dengan demikian, diagram alir pada Gambar 3 memainkan peran penting dalam mendefinisikan mekanisme otomatisasi dalam sistem dan

memastikan bahwa seluruh proses berjalan secara terkoordinasi serta responsif terhadap perubahan kualitas udara.



Gambar 3. Diagram Alir Sistem Kontrol Kualitas Udara

d. Algoritma

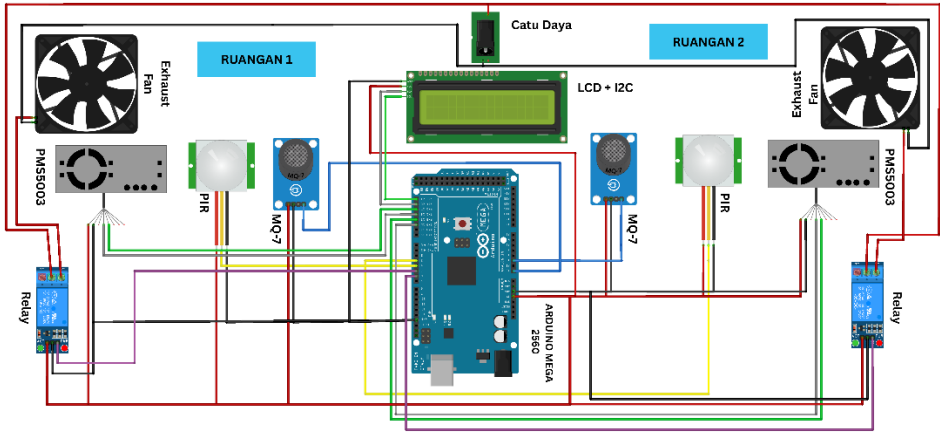
Penjelasan logika kerja sistem disajikan menggunakan pseudocode dalam bentuk algoritma yang merepresentasikan alur proses sistem secara terstruktur. Algoritma tersebut disajikan pada Tabel 2 dan mencakup tahapan inisialisasi perangkat, proses akuisisi data dari sensor kualitas udara dan sensor deteksi keberadaan, serta mekanisme pengambilan keputusan berdasarkan perbandingan nilai sensor dengan ambang batas yang telah ditetapkan untuk mengendalikan kerja relay secara otomatis.

Tabel 2. Algoritma Sistem Kontrol Kualitas Udara

INPUT: Nilai PM2.5, konsentrasi CO, status sensor PIR
OUTPUT: Status relay dan tampilan informasi kualitas udara
BEGIN 1. Inisialisasi LCD, sensor PM2.5, sensor CO (MQ-7), sensor PIR, dan relay 2. Membaca nilai kalibrasi sensor CO dari memori 3. Jika nilai kalibrasi tidak valid, lakukan proses kalibrasi sensor CO 4. LOOP 1. Membaca data PM2.5 dari masing-masing sensor 2. Membaca konsentrasi gas CO dari masing-masing sensor 3. Membaca status deteksi gerakan dari sensor PIR 4. IF PIR aktif AND (nilai CO melebihi ambang batas OR nilai PM2.5 melebihi ambang batas) THEN 1. Mengaktifkan relay ELSE 2. Menonaktifkan relay 5. Menampilkan nilai PM2.5 dan CO pada LCD 6. Menampilkan data ke serial monitor 5. END LOOP END

2.3. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dilakukan dengan menyusun seluruh komponen sistem ke dalam satu rangkaian terintegrasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Setiap ruangan dilengkapi satu set perangkat yang terdiri dari sensor MQ-7, PMS5003, sensor PIR, serta exhaust fan yang dikendalikan melalui modul relay, yang seluruhnya terhubung ke Arduino Mega sebagai pusat kendali. LCD Display berfungsi menampilkan informasi kualitas udara secara *real-time*. Penyusunan wiring diagram dilakukan secara sistematis untuk memastikan koneksi antar komponen tersusun dengan benar, sehingga meminimalkan potensi kesalahan saat implementasi serta mempermudah proses troubleshooting apabila terjadi gangguan [17].



Gambar 4. Wiring Skema Elektronik

2.4. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan bahwa prototipe berjalan sesuai dengan spesifikasi fungsional yang ditetapkan. Metode yang digunakan adalah *black box testing*, yaitu pendekatan yang mengevaluasi keluaran sistem berdasarkan berbagai variasi masukan tanpa memeriksa proses internal di dalam perangkat lunak [18].

Pengujian dilakukan pada dua prototipe ruangan yang masing-masing menggunakan satu set perangkat terdiri dari sensor MQ-7, PMS5003, PIR, relay, dan exhaust fan. Skenario yang diuji

mencakup kondisi ketika kadar CO melewati ambang batas, PM2.5 melebihi batas aman, sensor PIR mendeteksi keberadaan manusia, serta kombinasi dari ketiga kondisi tersebut. Setiap skenario diamati berdasarkan respons exhaust fan dan tampilan data sensor pada LCD Display. Hasil pengujian dicatat dalam bentuk tabel untuk memverifikasi apakah sistem memberikan output yang sesuai pada setiap kondisi. Pendekatan ini memastikan bahwa fungsi utama prototipe terutama dalam skenario multi-ruangan dapat bekerja secara konsisten dan andal.

Untuk memperoleh gambaran kuantitatif kinerja sistem, hasil pengujian dianalisis menggunakan perhitungan persentase keberhasilan. Persentase ini dihitung berdasarkan perbandingan antara jumlah skenario pengujian yang menghasilkan keluaran sesuai dengan yang diharapkan terhadap total skenario pengujian, sebagaimana ditunjukkan pada rumus dibawah ini.

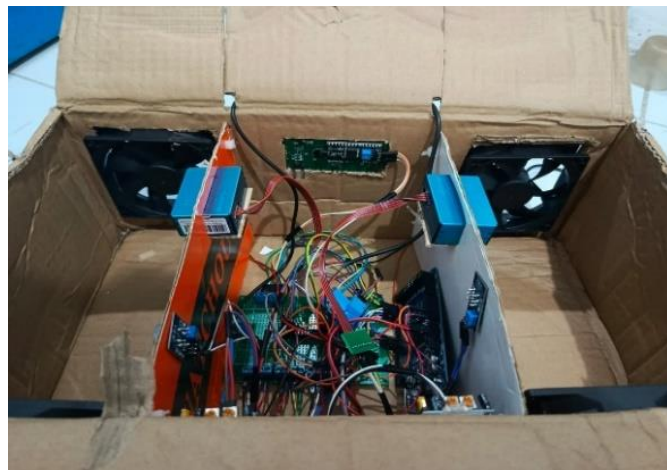
$$\text{Persentase Keberhasilan} = \frac{\text{Jumlah Pengujian Berhasil}}{\text{Total Skenario Pengujian}} \times 100 \quad (1)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini menyajikan uraian hasil implementasi dan pengujian prototipe alat kontrol kualitas udara yang telah dilakukan.

3.1 Hasil Perancangan Hardware

Gambar 5 menunjukkan hasil perancangan prototipe alat kontrol kualitas udara yang telah direalisasikan pada perangkat fisik. Seluruh komponen utama termasuk sensor MQ-7 untuk mendeteksi CO, sensor PMS5003 untuk memantau konsentrasi PM2.5, sensor PIR untuk mendeteksi keberadaan manusia, serta modul relay sebagai pengendali exhaust fan dirakit pada papan prototipe dan dihubungkan ke Arduino Mega sebagai pusat pemrosesan. Penataan komponen dilakukan dengan mempertimbangkan kemudahan alur kabel, kestabilan koneksi, dan aksesibilitas saat pengujian sehingga perangkat dapat berfungsi dengan baik saat dioperasikan di lingkungan nyata.



Gambar 5. Hasil Rancangan Prototipe Alat Kontrol Kualitas Udara

Prototipe juga dilengkapi dengan LCD Display yang berfungsi menampilkan informasi kualitas udara secara *real-time*, sehingga pengguna dapat memantau kondisi CO dan PM2.5 secara langsung. Integrasi seluruh komponen ini menghasilkan sistem yang mampu bekerja secara mandiri dalam setiap ruangan, sesuai konsep multi-ruangan yang dirancang pada penelitian ini. Hasil perakitan menunjukkan bahwa seluruh perangkat dapat beroperasi secara serempak dan responsif, sehingga siap untuk digunakan pada tahap pengujian performa sistem.

3.2 Visualisasi Data Pada Serial Monitor

Visualisasi dan monitoring data pada sistem ini dilakukan menggunakan Serial Monitor. Tampilan hasil pembacaan sensor kualitas udara, status deteksi keberadaan, serta kondisi relay ditunjukkan pada Gambar 6. Melalui visualisasi tersebut, kinerja sistem dapat diamati secara *real-*

time dan digunakan sebagai dasar dalam melakukan pengujian serta evaluasi terhadap respons sistem terhadap kondisi lingkungan

```
=====
PIR-1: DETECTED | Relay-1: ON
PIR-2: DETECTED | Relay-2: ON
PMS1 PM2.5: 55
PMS2 PM2.5: 54
CO-1: 9.36 | CO-2: 9.24
=====
PIR-1: DETECTED | Relay-1: ON
PIR-2: DETECTED | Relay-2: ON
PMS1 PM2.5: 55
PMS2 PM2.5: 55
CO-1: 9.38 | CO-2: 9.23
=====
PIR-1: DETECTED | Relay-1: ON
PIR-2: DETECTED | Relay-2: ON
PMS1 PM2.5: 55
PMS2 PM2.5: 55
CO-1: 9.37 | CO-2: 9.26
=====
PIR-1: DETECTED | Relay-1: ON
PIR-2: DETECTED | Relay-2: ON
PMS1 PM2.5: 55
PMS2 PM2.5: 55
CO-1: 9.36 | CO-2: 9.23
=====
```

Gambar 6. Visualisasi Data Pada Serial Monitor

3.3 Skenario Pengujian Sistem

Skenario pengujian disusun untuk mengevaluasi fungsionalitas sistem kontrol kualitas udara dalam ruangan menggunakan metode *black box testing*, yaitu dengan membandingkan keluaran sistem terhadap keluaran yang diharapkan berdasarkan kombinasi input tertentu.

a. Skenario Pengujian Kadar CO

Skenario pengujian kadar CO disusun berdasarkan variasi nilai CO yang berada di bawah dan di atas ambang batas 10 ppm. Setiap skenario mengamati respons sistem terhadap kondisi input tersebut melalui perubahan status exhaust fan, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Skenario Pengujian CO

No	Kondisi Input	Output yang Diharapkan
1	CO ≤ 10 ppm	Exhaust fan mati
2	CO > 10 ppm	Exhaust fan menyala

b. Skenario Pengujian Kadar PM2.5

Skenario pengujian PM2.5 disusun berdasarkan variasi nilai konsentrasi partikulat halus yang berada di bawah dan di atas ambang batas 50 µg/m³. Respons sistem diamati melalui perubahan status exhaust fan terhadap kondisi input tersebut, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Skenario Pengujian PM2.5

No	Kondisi Input	Output yang Diharapkan
1	PM2.5 ≤ 50 µg/m³	Exhaust fan mati
2	PM2.5 > 50 µg/m³	Exhaust fan menyala

c. Skenario Pengujian Sensor PIR

Skenario pengujian sensor PIR disusun untuk merepresentasikan kondisi terdeteksi dan tidak terdeteksinya keberadaan manusia di dalam ruangan. Hasil pengujian diamati melalui perubahan status exhaust fan sebagai respons terhadap kondisi input tersebut, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Skenario Pengujian Sensor PIR

No	Kondisi Input	Output yang Diharapkan
1	PIR tidak terdeteksi	Exhaust fan mati
2	PIR terdeteksi	Exhaust fan menyala

d. Skenario Pengujian Keseluruhan Sistem

Skenario pengujian keseluruhan disusun untuk merepresentasikan kondisi operasional sistem ketika beberapa parameter diuji secara bersamaan, meliputi kadar CO, konsentrasi PM2.5, dan deteksi keberadaan manusia. Respons sistem terhadap kombinasi kondisi tersebut diamati melalui status exhaust fan, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Skenario Pengujian Sensor PIR

No	Kondisi Input Sistem	Output yang Diharapkan
1	CO dan PM2.5 <= ambang batas, PIR tidak terdeteksi	Exhaust fan mati
2	CO atau PM2.5 tinggi, PIR tidak terdeteksi	Exhaust fan mati
3	CO atau PM2.5 tinggi, PIR terdeteksi	Exhaust fan menyala
4	CO dan PM2.5 tinggi, PIR terdeteksi	Exhaust fan menyala
5	CO dan PM2.5 <= ambang batas, PIR terdeteksi	Exhaust fan mati

3.4 Pengujian Kadar CO

Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa sistem dapat mendeteksi kenaikan konsentrasi karbon monoksida (CO) dan mengaktifkan exhaust fan ketika nilai melampaui ambang batas 10 ppm. Hasil pengujian untuk ruangan 1 ditampilkan pada Tabel 7, sedangkan hasil ruangan 2 ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 7. Pengujian CO Ruangan 1

Tanggal dan Waktu	Nilai CO (ppm)	Ambang CO (10 ppm)	Status Exhaust Fan	Keterangan
24-11-2025 22:03	4.8	Di bawah ambang	Mati	Sesuai
24-11-2025 22:10	3.1	Di bawah ambang	Mati	Sesuai
24-11-2025 22:20	13	Di atas ambang	Menyala	Sesuai
24-11-2025 23:14	2.6	Di bawah ambang	Mati	Sesuai
24-11-2025 23:18	2.6	Di bawah ambang	Mati	Sesuai

Tabel 8. Pengujian CO Ruangan 2

Tanggal dan Waktu	Nilai CO (ppm)	Ambang CO (10 ppm)	Status Exhaust Fan	Keterangan
24-11-2025 22:03	6.2	Di bawah ambang	Mati	Sesuai
24-11-2025 22:13	11	Di atas ambang	Menyala	Sesuai
24-11-2025 22:17	4.2	Di bawah ambang	Mati	Sesuai
24-11-2025 23:15	3.4	Di bawah ambang	Mati	Sesuai
24-11-2025 22:18	3.4	Di bawah ambang	Mati	Sesuai

3.5 Pengujian Kadar PM2.5

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu mengidentifikasi konsentrasi partikulat halus PM2.5 dan memberikan respons sesuai ambang batas 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tabel hasil pengujian ruangan 1 disajikan pada Tabel 9, dan hasil untuk ruangan 2 dicantumkan pada Tabel 10.

Tabel 9. Pengujian PM2.5 Ruangan 1

Tanggal dan Waktu	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ambang PM2.5 (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Status Exhaust Fan	Keterangan
24-11-2025 22:21	107	Di atas ambang	Menyala	Sesuai
24-11-2025 22:31	88	Di atas ambang	Menyala	Sesuai
24-11-2025 22:40	49	Di bawah ambang	Mati	Sesuai
24-11-2025 23:19	88	Di atas ambang	Menyala	Sesuai
24-11-2025 23:28	97	Di atas ambang	Menyala	Sesuai

Tabel 10. Pengujian PM2.5 Ruangan 2

Tanggal dan Waktu	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ambang PM2.5 (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Status Exhaust Fan	Keterangan
24-11-2025 22:24	119	Di atas ambang	Menyala	Sesuai
24-11-2025 22:28	105	Di atas ambang	Menyala	Sesuai
24-11-2025 22:46	46	Di bawah ambang	Mati	Sesuai
24-11-2025 23:20	96	Di atas ambang	Menyala	Sesuai
24-11-2025 23:28	97	Di atas ambang	Menyala	Sesuai

3.6 Pengujian Sensor PIR

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan sistem dapat mendeteksi keberadaan manusia melalui sensor PIR. Walaupun keberadaan manusia tidak berpengaruh pada ambang polusi,

kondisi ini dipertimbangkan sebagai pemicu aktivasi sistem jika polusi sedang meningkat. Tabel hasil pengujian ruangan 1 dapat dilihat pada Tabel 11, sedangkan ruangan 2 ditampilkan pada Tabel 12.

Tabel 11. Pengujian PIR Ruangan 1

Tanggal dan Waktu	Deteksi PIR	Status Exhaust Fan	Keterangan
24-11-2025 22:51	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai
24-11-2025 22:53	Terdeteksi	Menyala	Sesuai

Tabel 12. Pengujian PIR Ruangan 2

Tanggal dan Waktu	Deteksi PIR	Status Exhaust Fan	Keterangan
24-11-2025 22:53	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai
24-11-2025 22:55	Terdeteksi	Menyala	Sesuai

3.7 Pengujian Keseluruhan

Pengujian keseluruhan dilakukan untuk menilai performa sistem ketika menghadapi beberapa kondisi secara bersamaan, seperti kadar CO yang melampaui ambang batas, konsentrasi PM2.5 yang berada di atas nilai aman, serta keberadaan manusia yang terdeteksi oleh sensor PIR. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa sistem mampu memberikan respons yang konsisten dan sesuai logika kendali ketika berbagai parameter kualitas udara berada dalam kondisi kritis secara simultan. Hasil pengujian untuk Ruangan 1 ditampilkan pada Tabel 13, sedangkan hasil untuk Ruangan 2 disajikan pada Tabel 14, yang masing-masing menunjukkan perilaku sistem terhadap kombinasi skenario tersebut.

Tabel 13. Pengujian Keseluruhan Alat Ruangan 1

Tanggal & Waktu	CO (ppm)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PIR	Status Exhaust Fan	Keterangan
24/11/2025 23:46	2.7	131	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai
24/11/2025 23:55	2.6	138	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:00	2.7	50	Terdeteksi	Mati	Sesuai
25/11/2025 00:10	2.9	104	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:25	9.4	252	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai
25/11/2025 00:35	4.2	159	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:40	2.8	110	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:45	14	589	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:50	3	175	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:55	2.8	76	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai

Tabel 14. Pengujian Keseluruhan Alat Ruangan 2

Tanggal & Waktu	CO (ppm)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PIR	Status Exhaust Fan	Keterangan
24/11/2025 23:46	3.5	146	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai
24/11/2025 23:55	3.5	147	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:06	3.6	116	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:22	3.8	164	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai
25/11/2025 00:30	3.6	191	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai
25/11/2025 00:38	6	177	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:44	3.5	146	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 00:53	3.5	146	Terdeteksi	Menyala	Sesuai
25/11/2025 01:00	3.6	124	Tidak terdeteksi	Mati	Sesuai
25/11/2025 01:05	3.5	49	Terdeteksi	Mati	Sesuai

Berdasarkan hasil pengujian keseluruhan pada dua ruangan yang mencakup kombinasi parameter CO, PM2.5, dan deteksi PIR, sistem menunjukkan kinerja yang konsisten. Seluruh skenario pengujian memberikan hasil sesuai dengan logika kendali yang dirancang, sehingga tingkat keberhasilan sistem mencapai 100%, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 15.

Tabel 15. Rekapitulasi Hasil Pengujian Keseluruhan

Kategori Hasil	Jumlah Skenario	Persentase
Berhasil (Sesuai)	20	100%
Gagal (Tidak Sesuai)	0	0%
Total	20	100%

Jumlah 20 skenario diperoleh dari pengujian keseluruhan pada dua ruangan, masing-masing terdiri dari 10 skenario pengujian kombinasi parameter CO, PM2.5, dan PIR.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol kualitas udara dalam ruangan berbasis Arduino yang mampu memantau kadar CO, PM2.5, serta keberadaan manusia secara *real-time*. Pengujian keseluruhan sistem menggunakan metode *black box testing* pada dua ruangan dengan berbagai skenario menunjukkan tingkat keberhasilan sebesar 100%, di mana seluruh keluaran sistem sesuai dengan spesifikasi fungsional yang telah ditetapkan. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi antara sensor kualitas udara, sensor PIR, dan logika pengendalian relay mampu bekerja secara konsisten dalam merespons kondisi udara yang berbeda. Keunggulan utama sistem ini terletak pada desain multi-ruangan yang memungkinkan setiap ruangan beroperasi secara independent serta konstruksi perangkat yang sederhana namun fungsional. Meskipun demikian, keterbatasan masih terdapat pada kemampuan sensor PIR yang hanya mendeteksi manusia ketika ada pergerakan, sehingga keberadaan pengguna dalam posisi diam tidak selalu terdeteksi. Selain itu, sistem belum memiliki fitur penyimpanan data jangka panjang maupun pemantauan jarak jauh.

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang telah diidentifikasi, pengembangan lebih lanjut masih sangat terbuka untuk meningkatkan kinerja dan fungsionalitas sistem. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan metode deteksi manusia yang lebih akurat dengan memanfaatkan sensor kamera atau teknologi vision-based seperti ESP32-CAM atau OpenMV. Pendekatan ini memungkinkan sistem mengenali keberadaan manusia meskipun tidak bergerak, sehingga logika pengendalian menjadi lebih adaptif terhadap kondisi nyata di dalam ruangan. Pengembangan lain yang perlu dipertimbangkan adalah integrasi sistem dengan platform *Internet of Things* (IoT) agar data kualitas udara dapat disimpan sebagai riwayat, ditampilkan melalui dashboard, serta dianalisis untuk keperluan monitoring maupun prediksi jangka panjang. Selain itu, penambahan aktuator tambahan atau mekanisme ventilasi otomatis pada ruangan yang lebih besar dapat meningkatkan efektivitas distribusi sirkulasi udara. Dengan berbagai pengembangan tersebut, sistem kontrol kualitas udara berpotensi menjadi solusi yang lebih cerdas, efisien, dan relevan untuk digunakan pada berbagai kondisi lingkungan nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Hidayati *et al.*, “Sistem Pemantauan Kualitas Udara Secara Real-Time Menggunakan ESP32 dan Teknologi IoT,” *Djtechno Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 5, no. 2, pp. 232-245, 2024, doi: 10.46576/djtechno.v5i2.4619.
- [2] J. Jumadil, “Analisis Kualitas Udara (Nilai Parameter PM2,5 dan Karbon Monoksida) di Sekitar Kampus Universitas Bosowa Makassar,” *Jurnal Ilmiah Ecosystem*, vol. 23, no. 1, pp. 164–171, Apr. 2023, doi: 10.35965/eco.v23i1.2514.
- [3] I. Iskandar, W. Rimalia, and J. Jeffry, and B. L. E. Panggabean, “Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Ruangan Berbasis Internet of Things (IoT),” *JSCE: Journal of System and Computer Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 1–13, 2024.
- [4] I. Q. A’yun and R. Umaroh, “Polusi Udara dalam Ruangan dan Kondisi Kesehatan: Analisis Rumah Tangga Indonesia,” *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia*, vol. 23, no. 1, pp. 16–26, 2023, doi: 10.21002/jepi.2022.02.
- [5] R. N. Pietraru, A. Olteanu, I. R. Adochiei, and F. C. Adochiei, “Reengineering Indoor Air Quality Monitoring Systems to Improve End-User Experience,” *Sensors*, vol. 24, no. 8, 2024, doi: 10.3390/s24082659.
- [6] M. Afrial, *et al.*, “Multi-Sensor Indoor Air Quality Monitoring with Real-Time Logging and Air Purifier Integration,” MDPI AG, Aug. 2025, pp. 1-8, doi: 10.3390/materproc2025023012.
- [7] A. A. Rahmadani, *et al.*, “Enhancing Campus Environment: Real-Time Air Quality Monitoring Through IoT and Web Technologies,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 14, no. 1, pp. 1-26, 2025, doi: 10.3390/jsan14010002.

- [8] K. Wijoyo and T. Guntoro, "SMR (Smart Medical Room) Berbasis IoT (Internet of Things) Pengendali Multi-variabel Suhu dan Kelembaban Udara Secara Manual dan Otomatis Ruang Medis," *Indonesian Journal of Laboratory*, vol. 6, no. 1, pp. 33-44, 2023, doi: 10.22146/ijl.v1i1.81458.
- [9] J. Pebralia, H. Akhsan, and I. Amri, "Implementasi Internet of Things (Iot) dalam Monitoring Kualitas Udara Pada Ruang Terbuka," *Jurnal Kumparan Fisika*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2024, doi: 10.33369/jkf.7.1.1-8.
- [10] R. Muttaqin, *et al.*, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Iot (Internet of Things) dengan Sensor DHT11 dan Sensor MQ135," *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pedidikan*, vol. 6, no. 2, pp. 102-115, 2024, doi: 10.14710/jplp.6.2.102-115.
- [11] Y. C. Nugroho, *et al.*, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Arduino Untuk Mendeteksi Polusi Udara Di Perkotaan," *Jurnal TIKomSiN*, vol. 11, no. 2, pp. 45-52, 2023.
- [12] N. Ningsih, A. D. Ramadhani, A. Nurcahya, and N. Azizah, "Klasifikasi dan Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan menggunakan Thingspeak," *TRIAC: Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 10, no. 1, pp. 1-5, 2023, doi: 10.21107/triac.v10i1.17501
- [13] R. M. R. Akbar, T. Y. Arif, and M. Irhamsyah, "Analisis Performansi Protokol MQTT Pada Sistem Pemantauan Kualitas Udara Ruangan Berbasis IoT," *KITEKTRO: Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, dan Elektro*, vol. 8, no. 3, pp. 102–109, 2023, doi: 10.24815/kitektro.v8i3.35074.
- [14] R. Irfani *et al.*, "Rancang Bangun Sistem Exhaust Fan Otomatis Berbasis Sensor DHT11 dan Mikrokontroler ESP32 untuk Peningkatan Kualitas Udara di Smoking Area," *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, vol. 9, no. 1, pp. 102–112, 2025, doi: 10.30588/jeemm.v9i1.2161.
- [15] M. Erik, F. Nurdianto, and R. Hidayat, "AeroSense Monitor Integrasi Sensor DHT11 dan MQ135 untuk Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Arduino Uno," *Jurnal Komputer dan Elektro Sains*, vol. 2, no. 2, pp. 8–11, 2024, doi: 10.58291/komets.v2i2.171.
- [16] A. Ismamudi and W. Pramusinto, "Penerapan Nodemcu dan Sensor Suhu Mlx90614 untuk Hand Sanitizer Otomatis Berbasis IoT," *SKANIKA: Sistem Komputer dan Teknik Informatika*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2023, doi: 10.36080/skanika.v6i1.2995
- [17] H. Hamuda and A. Setiawan, "Integrasi Sistem Keamanan Rumah Pintar Berbasis ESP32-CAM dan Sensor PIR dengan Notifikasi Real-Time melalui WhatsApp Bot," *SKANIKA: Sistem Komputer dan Teknik Informatika*, vol. 8, no. 2, pp. 204–218, 2025, doi: 10.36080/skanika.v8i2.3387.
- [18] V. K. Pratifi, A. T. Sasongko, and D. Afandi, "Integrasi Sensor DHT11 dan PIR dalam Sistem Otomatisasi Suhu dan Deteksi Gerakan dalam Ruangan Menggunakan Mikrokontroler Arduino Nano," *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 4, no. 3, pp. 1148–1159, 2024, doi: 10.57152/malcom.v4i3.1490.