

RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING DAN KONTROL KUALITAS UDARA DALAM RUANGAN BERBASIS IOT MENGGUNAKAN METODE FUZZY LOGIC MAMDANI

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN IOT-BASED INDOOR AIR QUALITY MONITORING AND CONTROL SYSTEM USING THE MAMDANI FUZZY LOGIC METHOD

Achmad Rizki Mauluddin¹, Denny Irawan²

Universitas Muhammadiyah Gresik, Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Gresik^{1,2}
achmadrizkimauluddin@gmail.com¹, den2mas@umg.ac.id²

ABSTRAK

Rumah merupakan sebuah tempat yang kita pakai sebagai sarana untuk mengistirahatkan tubuh dari aktivitas sehari-hari. Kondisi rumah tentu berpengaruh terhadap proses pemulihan diri dari kelelahan. Namun apabila rumah terletak di daerah industri tentu sulit untuk menjaga kualitas udara dalam ruangan rumah tetap segar dan bebas dari debu di lingkungan industri. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan merancang dan merealisasikan sistem *monitoring* dan kontrol kualitas udara dalam ruangan berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama. Sistem memanfaatkan sensor MQ-135 untuk mendeteksi kadar CO₂, sensor Sharp GP2Y1010AU0F untuk mengukur konsentrasi debu, dan sensor DHT22 untuk memantau suhu serta kelembapan udara. Data hasil pembacaan sensor ditampilkan secara real-time melalui LCD I2C dan aplikasi *Blynk*. Metode *Fuzzy Logic* Mamdani digunakan untuk menentukan kecepatan *intake fan* dan *exhaust fan*, kemudian hasilnya dikonversi menjadi sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengendalikan *fan* melalui MOSFET D4184. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki rata-rata kesalahan pembacaan suhu sebesar 0,32% dan kelembapan sebesar 0,81%, sedangkan sensor GP2Y1010AU0F dan MQ-135 mampu mendeteksi perubahan kualitas udara sebagai masukan sistem *fuzzy*. Pengujian PWM menunjukkan kecepatan *fan* sebesar 3460 RPM pada kondisi lambat dan meningkat menjadi 4507 RPM pada kondisi cepat. Selain itu, seluruh data sensor berhasil ditampilkan secara real-time melalui aplikasi *Blynk*. Berdasarkan hasil tersebut, sistem mampu melakukan *monitoring* dan pengendalian kualitas udara dalam ruangan secara otomatis sesuai kondisi lingkungan.

Kata Kunci: Internet of Things, ESP32, *Fuzzy Logic*, Kualitas Udara, MQ-135, GP2Y1010AU0F

ABSTRACT

A house is a place where people rest and recover from their daily activities. Therefore, indoor environmental conditions play an important role in maintaining occupants' health and comfort. However, houses located in industrial areas are often exposed to dust and air pollution, making it difficult to maintain good indoor air quality. This study aims to design and implement an *Internet of Things* (IoT)-based indoor air quality *monitoring* and control system using an ESP32 microcontroller as the main controller. The system utilizes an MQ-135 sensor to detect CO₂ concentration, a Sharp GP2Y1010AU0F sensor to measure dust concentration, and a DHT22 sensor to monitor temperature and humidity. The sensor readings are displayed in real time on a I2C LCD and the *Blynk* application. The Mamdani *Fuzzy Logic* method is employed to determine the operating speeds of the *intake fan* and *exhaust fan*. The *fuzzy output* is then converted into a *Pulse Width Modulation* (PWM) signal to control the *fans* through a D4184 MOSFET driver. Experimental results show that the DHT22 sensor achieved an average measurement error of 0.32% for temperature and 0.81% for humidity, while the GP2Y1010AU0F and MQ-135 sensors successfully detected changes in indoor air quality as *inputs* to the *fuzzy* control system. PWM testing showed that the *fan* speed increased from 3460 RPM under low-speed operation to 4507 RPM under high-speed operation. In addition, all sensor data were successfully displayed in real time through the *Blynk* application. Based on these results, the proposed system is capable of *monitoring* and automatically controlling indoor air quality according to environmental conditions.

Kata Kunci: Internet of Things, ESP32, *Fuzzy Logic*, Air Quality, MQ-135, Sharp GP2Y1010AU0F.

PENDAHULUAN

Rumah merupakan tempat untuk beristirahat sehingga kualitas udara di dalamnya sangat memengaruhi kesehatan dan kenyamanan. Namun, rumah yang berada di kawasan industri rentan

terpapar debu dan pencemaran udara. Kualitas udara dalam ruangan dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, debu, serta konsentrasi karbon dioksida (CO₂) akibat aktivitas manusia (Nessa Aqila Zulfahmi Putri, Uray Ristian, 2024).

Mengingat sekitar 90% waktu manusia dihabiskan di dalam ruangan, kualitas udara menjadi faktor penting yang harus diperhatikan (Fredy Agung Dwi Cahyono, 2024).

Peningkatan kadar CO₂ dapat menyebabkan gangguan pernapasan, keracunan, dan meningkatkan risiko *Sick Building Syndrome* (SBS). Selain itu, partikel debu halus (PM2.5) yang berasal dari asap rokok, pembakaran, dan aktivitas industri juga berpotensi menimbulkan penyakit seperti bronkitis, sesak napas, dan pneumokoniosis (Nafi'atul Irbah, Globila Nurika, 2024).

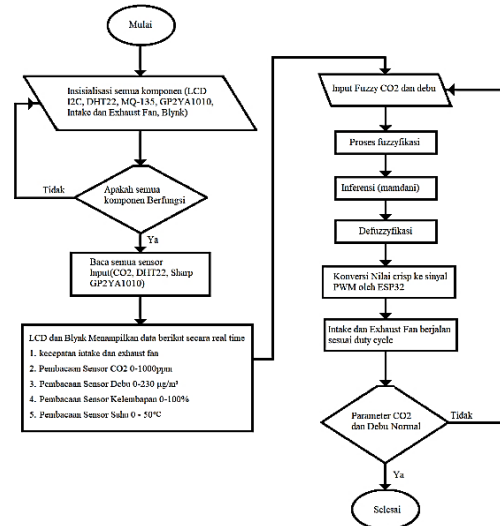
Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan sistem yang mampu memantau sekaligus mengendalikan kualitas udara secara otomatis. Perkembangan teknologi sensor, mikrokontroler, *Internet of Things* (IoT), dan metode *Fuzzy Logic* memungkinkan sistem mengambil keputusan secara adaptif berdasarkan kondisi lingkungan sehingga pengendalian menjadi lebih efektif dibandingkan sistem *monitoring* saja (Moch Bayu Aji Pamungkas, 2024; Muhammad Rifqi Zulkarnain, 2024). Oleh karena itu, penelitian ini merancang sistem *monitoring* dan kontrol kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT menggunakan metode *Fuzzy Logic* Mamdani.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem serupa. Penelitian pertama mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara berbasis ESP32 dengan sensor MQ-135 dan MQ-7 serta notifikasi Telegram secara real-time (Latifah Hanum, 2023). Penelitian kedua memanfaatkan ESP32 dengan sensor MQ-135, MG811, sensor debu, MQ2, MQ8, dan MQ9 untuk memantau berbagai parameter kualitas udara yang ditampilkan melalui platform IoT OVoRD (Grace C. Rumampuk, Vecky C. Poekoel, 2021). Penelitian ketiga menggunakan sensor MQ-135 dan DHT11 yang terhubung ke NodeMCU ESP32 dan *Blynk* Cloud untuk pemantauan suhu, kelembapan, dan kualitas udara (Rodhotul Muttaqin, Wasi Sakti Wiwit Prayitno, Natalia Erna Setyaningsih, 2024). Penelitian keempat mengembangkan sistem berbasis NodeMCU dengan sensor MQ-135, MQ-2, dan DHT22 serta notifikasi Telegram ketika kualitas udara berada pada kondisi berbahaya (SUKMAWATI, 2025). Penelitian kelima merancang sistem *monitoring* dan kontrol menggunakan ESP32, sensor GP2Y1010AU0FAU0F, MQ-7, MQ-2, serta aktuator kipas yang terhubung ke server web melalui IoT (Fredy Agung Dwi Cahyono, 2024).

Berdasarkan kajian tersebut, sebagian besar penelitian masih berfokus pada *monitoring* dan notifikasi, sedangkan pengendalian adaptif menggunakan Logika *Fuzzy* Mamdani serta integrasi parameter CO₂ dan debu masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem *monitoring* dan kontrol kualitas udara berbasis IoT yang menampilkan data melalui LCD

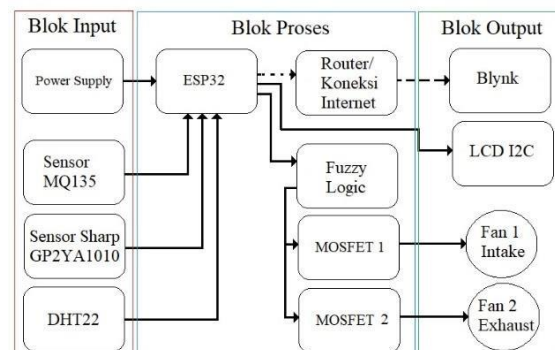
I2C dan *Blynk* serta mengendalikan *intake fan* dan *exhaust fan* secara otomatis menggunakan metode *Fuzzy Logic* Mamdani berdasarkan kadar CO₂ dan debu. Sistem ini diharapkan mampu menjaga kualitas udara dalam ruangan tetap sehat, aman, dan nyaman..

METODE



Gambar 1. Flowchart System

Gambar 1. menunjukkan *flowchart* sistem yang diawali dengan inisialisasi LCD I2C, sensor DHT22, sensor MQ-135, sensor Sharp GP2Y1010AU0F, *fan intake*, *fan exhaust*, dan koneksi *Blynk*. Setelah seluruh komponen siap, sensor DHT22 mengukur suhu dan kelembapan, sensor MQ-135 mendeteksi kadar CO₂, dan sensor Sharp GP2Y1010AU0F mengukur konsentrasi debu. Hasil pembacaan sensor ditampilkan pada LCD I2C dan aplikasi *Blynk*. Data dari sensor MQ-135 dan GP2Y1010AU0F selanjutnya diproses menggunakan logika *fuzzy* pada ESP32 melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai *crisp* berupa kecepatan *fan*. Nilai tersebut kemudian dikonversi menjadi sinyal PWM untuk mengendalikan MOSFET D4184 sehingga *fan intake* dan *exhaust* bekerja sesuai kondisi kualitas udara.



Gambar 2. Blok Diagram System

Gambar 2. menunjukkan blok diagram sistem yang terdiri atas tiga bagian utama, yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Pada blok *input*, *power supply* menyediakan catu daya bagi seluruh rangkaian, sedangkan sensor DHT22 mengukur suhu dan kelembapan, sensor MQ-135 mendeteksi kadar CO₂, dan sensor Sharp GP2Y1010AU0F mengukur konsentrasi debu.

Pada blok *proses*, ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama yang mengolah data sensor, menjalankan logika *fuzzy* menggunakan masukan dari sensor MQ-135 dan GP2Y1010AU0F, serta menampilkan seluruh parameter pada LCD I2C dan aplikasi *Blynk*. Hasil proses *fuzzy* berupa nilai *crisp* kemudian dikonversi menjadi sinyal PWM untuk mengendalikan MOSFET D4184 sebagai driver *exhaust fan* dan *intake fan*.

Pada blok *output*, sistem menampilkan data CO₂, debu, suhu, dan kelembapan secara real-time melalui LCD I2C dan *Blynk*, serta mengatur kecepatan *intake fan* dan *exhaust fan* secara otomatis sehingga sirkulasi udara tetap optimal dan kualitas udara dalam ruangan terjaga.

Fuzzy Mamdani

Metode *Fuzzy mamdani* merupakan proses pengambilan keputusan berdasarkan himpunan *fuzzy*, *fuzzy* aturan dan logika *fuzzy* dengan metode Mamdani (*min-max*). Pada metode Mamdani, himpunan *fuzzy* ditentukan dengan menentukan nilai terkecil dari setiap aturan yang digunakan. Nilai tersebut selanjutnya dipakai untuk menyesuaikan area *fuzzy* dan digabungkan pada bagian *output* menggunakan operator OR (*union*). Dalam perancangan logika *fuzzy* Mamdani terdapat tiga tahapan utama, yaitu proses *fuzzifikasi*, pembentukan basis aturan (*rule base*), dan proses *defuzzifikasi* untuk memperoleh hasil *output* yang tegas (Salsabila Naura Putri, 2021).

Standar kualitas udara

Sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, untuk nilai ambang batas kadar partikulat debu adalah sebesar 230 µg/m³ selama 24 jam (Nur Annisa Putri Indirwan, Novita Medyati, 2023).

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 48 Tahun 2016 tentang Standar Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Kondisi termal ruang harus memenuhi persyaratan kesehatan dan kenyamanan bagi penghuninya. Dalam peraturan tersebut ditetapkan bahwa suhu ruangan yang direkomendasikan berada pada kisaran 23°C hingga 26°C, sedangkan kelembapan relatif yang memenuhi standar kenyamanan berada pada rentang 40% hingga 60% RH. Pemenuhan

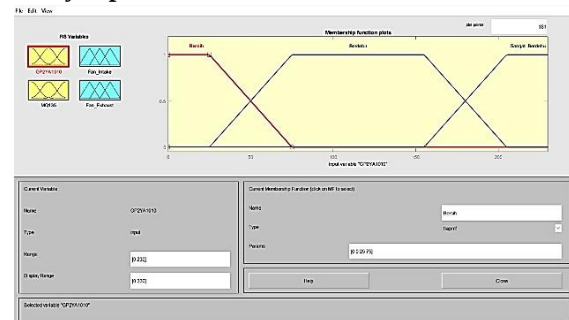
kisaran suhu dan kelembapan tersebut bertujuan untuk menciptakan lingkungan yang nyaman serta mendukung kesehatan dan produktifitas pengguna ruangan (Fadhila, 2024).

Berdasarkan hasil kajian terhadap 43 pedoman kualitas udara dalam ruangan yang diterbitkan oleh berbagai organisasi dan negara, nilai 1000 ppm merupakan nilai ambang yang paling umum digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi kecukupan ventilasi dalam ruangan. Meskipun demikian, beberapa pedoman internasional menerapkan nilai ambang yang berbeda sesuai dengan tujuan penggunaan bangunan, karakteristik ventilasi, dan regulasi yang berlaku pada masing-masing negara. Oleh karena itu, konsentrasi CO₂ tidak digunakan sebagai satu-satunya parameter untuk menentukan kualitas udara dalam ruangan, melainkan sebagai indikator yang merepresentasikan kondisi ventilasi suatu ruang.

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini menggunakan konsentrasi CO₂ sebagai salah satu variabel masukan pada sistem kontrol berbasis logika *fuzzy*. Nilai 1000 ppm digunakan sebagai acuan transisi menuju kategori konsentrasi CO₂ tinggi karena merupakan nilai yang paling banyak digunakan dalam berbagai pedoman internasional sebagai indikator evaluasi kecukupan ventilasi dalam ruangan (Mendell et al., 2024).

Perancangan Fuzzy Logic

Fuzzy Input GP2Y1010AU0F



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Input GP2Y1010AU0F

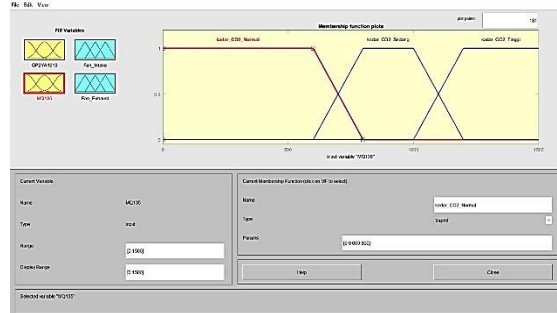
Gambar 3. Merupakan Fungsi keanggotaan *Fuzzy* dari *Input* sensor GP2Y1010AU0F dengan detail persamaan sebagai berikut :

$$\mu_R \text{ Bersih}[x] = \begin{cases} 1; & x < 25 \\ \frac{75-x}{75-25} & 25 < x < 75 \\ 0; & x > 75 \end{cases}$$

$$\mu_R \left(\text{Berdebu}[x] \right) = \begin{cases} \frac{x-25}{75-25}; & 25 < x < 75 \\ \frac{75-x}{205-75}; & 75 < x < 155 \\ \frac{205-x}{205-155}; & 155 < x < 205 \\ 0; & x \leq 25 \text{ atau } x \geq 205 \end{cases}$$

$$\mu_R \text{ Sangat Berdebu}[x] = \begin{cases} 0; & x < 155 \\ \frac{x-155}{205-155}; & 155 < x < 205 \\ 1; & x \geq 205 \end{cases}$$

Fuzzy Input MQ-135



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Input MQ-135

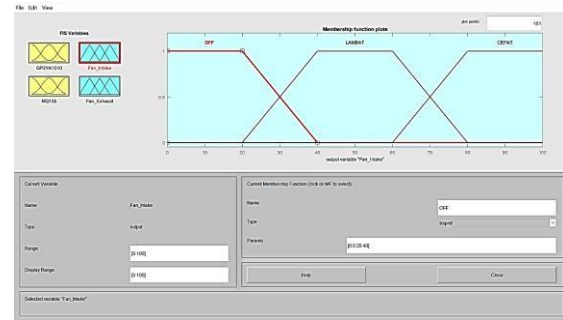
Gambar 4. Merupakan Fungsi keanggotaan Fuzzy dari Input sensor MQ-135 dengan detail persamaan sebagai berikut :

$$\mu_R \text{ Kadar Co2 Normal}[x] = \begin{cases} \frac{400-x}{600-400}; & 400 < x < 600 \\ 1; & 600 < x < 800 \\ 0; & x > 800 \end{cases}$$

$$\mu_R \text{ Kadar Co2 Sedang}[x] = \begin{cases} \frac{x-400}{600-400}; & 400 < x < 600 \\ \frac{1000-x}{1000-800}; & 800 < x < 1000 \\ 0; & x \leq 400 \text{ atau } x \geq 1000 \end{cases}$$

$$\mu_R \text{ Kadar Co2 Tinggi}[x] = \begin{cases} 0; & x < 800 \\ \frac{x-800}{1000-800}; & 800 < x < 1000 \\ 1; & x \geq 1000 \end{cases}$$

Fuzzy Output Fan Intake



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan Output Fan Intake

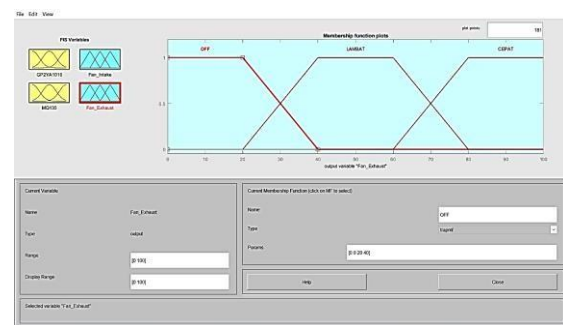
Gambar 5. Merupakan Fungsi keanggotaan Fuzzy dari Output Fan Intake dengan detail persamaan sebagai berikut :

$$\mu_R \text{ OFF}[x] = \begin{cases} 1; & x < 20 \\ \frac{40-x}{40-20}; & 20 < x < 40 \\ 0; & x > 40 \end{cases}$$

$$\mu_R \text{ Lambat}[x] = \begin{cases} \frac{x-20}{40-20}; & 20 < x < 40 \\ 1; & 40 < x < 60 \\ \frac{80-x}{80-60}; & 60 < x < 80 \\ 0; & x \leq 20 \text{ atau } x \geq 80 \end{cases}$$

$$\mu_R \text{ Cepat}[x] = \begin{cases} 0; & x < 60 \\ \frac{x-60}{80-60}; & 60 < x < 80 \\ 1; & x \geq 80 \end{cases}$$

Fuzzy Output Fan Exhaust



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan Output Fan Exhaust

Gambar 6. Merupakan Fungsi keanggotaan Fuzzy dari Output Fan Exhaust dengan detail persamaan sebagai berikut :

$$\mu_R \text{ OFF}[x] = \begin{cases} 1; & x < 20 \\ \frac{40-x}{40-20}; & 20 < x < 40 \\ 0; & x > 40 \end{cases}$$

$$\mu_R \text{ Lambat}[x] = \begin{cases} \frac{x-20}{40-20}; & 20 < x < 40 \\ 1; & 40 < x < 60 \\ \frac{80-x}{80-60}; & 60 < x < 80 \\ 0; & x \leq 20 \text{ atau } x \geq 80 \end{cases}$$

$$\mu_R \text{ Cepat}[x] = \begin{cases} 0; & x < 60 \\ \frac{x-60}{80-60}; & 60 < x < 80 \\ 1; & x \geq 80 \end{cases}$$

Kemudian Seluruh Fungsi keanggotaan tersebut diproses menggunakan rules yang telah disusun sebagai berikut.

Tabel 1. Rules Fuzzy

If	GP2Y10 10AU0F	And	MQ-135	Then	Fan Intake	Fan Exhaust
If	Bersih	And	Normal	Then	Off	Off
If	Bersih	And	Sedang	Then	Lambat	Lambat
If	Bersih	And	Tinggi	Then	Cepat	Cepat
If	Berdebu	And	Normal	Then	Lambat	Cepat
If	Berdebu	And	Sedang	Then	Lambat	Cepat
If	Berdebu	And	Tinggi	Then	Cepat	Cepat
If	Sangat Berdebu	And	Normal	Then	Lambat	Cepat
If	Sangat Berdebu	And	Sedang	Then	Lambat	Cepat
If	Sangat Berdebu	And	Tinggi	Then	Lambat	Cepat

Tabel 1. menunjukkan aturan (*rule base*) logika *fuzzy* yang digunakan untuk menentukan kecepatan *intake fan* dan *exhaust fan* berdasarkan kondisi kadar debu yang dibaca sensor GP2Y1010AU0F dan konsentrasi CO₂ yang dideteksi sensor MQ-135. Semakin tinggi tingkat debu dan CO₂, maka kecepatan *fan* akan meningkat untuk mempercepat sirkulasi udara. Sebaliknya, ketika kualitas udara masih baik, kedua *fan* bekerja pada kecepatan rendah atau mati sehingga penggunaan energi menjadi lebih efisien. Aturan-aturan tersebut menjadi dasar proses inferensi dalam metode *Fuzzy Mamdani* untuk menghasilkan kecepatan *fan* yang sesuai dengan kondisi udara di dalam ruangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah proses perancangan dan perakitan selesai dilakukan, diperoleh sebuah prototipe sistem *monitoring* dan kontrol kualitas udara dalam ruangan berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan metode *Fuzzy Logic Mamdani*. Sistem terdiri dari ESP32 sebagai pengendali utama, sensor MQ-135 untuk mendeteksi kadar CO₂, sensor Sharp GP2Y1010AU0F sebagai pendeteksi debu, sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan, LCD I2C sebagai media *monitoring* lokal, aplikasi *Blynk* sebagai media *monitoring* jarak jauh, serta *intake fan* dan *exhaust*

fan yang dikendalikan menggunakan MOSFET D4184 melalui sinyal PWM.



Gambar 7. Prototipe Alat

Hasil dan pembahasan memaparkan hasil penelitian ataupun analisis yang diperoleh. Berbagai fakta serta fenomena yang dianggap penting dapat dijabarkan lebih lanjut pada bagian ini. Setelah itu, dilanjutkan dengan pembahasan secara mendalam dengan menyebutkan temuan atau keponiran gagasan beserta signifikansinya.

Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membaca kondisi kualitas udara.

Pengujian Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 diuji dengan memberikan beberapa kondisi udara yang berbeda sehingga menghasilkan nilai konsentrasi CO₂ yang bervariasi.

Tabel 2. Pengujian Sensor MQ-135

Kondisi Pengujian	Hasil Sensor
Normal	362
Normal	389
Normal	452
Normal	576
Sedang	648
Sedang	725
Sedang	845
Sedang	936
Tinggi	1087
Tinggi	1245

Berdasarkan data simulasi, sensor MQ-135 menunjukkan peningkatan nilai konsentrasi CO₂ seiring bertambahnya tingkat pencemaran udara. Pada kondisi udara bersih, nilai berada pada rentang <400-600 ppm, sedangkan pada kondisi sedang meningkat menjadi 600–1000 ppm. Pada kondisi udara tercemar, nilai mencapai lebih dari 1000 ppm sehingga sistem mengklasifikasikan kualitas udara ke dalam kategori tinggi.

Pengujian Sensor GP2Y1010AU0F

Pengujian sensor GP2Y1010AU0F dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi konsentrasi partikel debu di dalam ruangan. Pengujian dilakukan dengan memberikan beberapa kondisi lingkungan yang berbeda, mulai dari udara bersih hingga udara berdebu. Nilai hasil pembacaan sensor kemudian diamati untuk mengetahui respons sensor terhadap perubahan konsentrasi debu.

Tabel 3. Tabel Pengujian sensor GP2Y1010AU0F

Kondisi Pengujian	Hasil Sensor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Klasifikasi
Debu ringan	46	Bersih
Debu ringan	71	Bersih
Debu sedang	94	Berdebu
Debu sedang	138	Berdebu
Debu sedang	172	Berdebu
Debu sedang	194	Berdebu
Debu sangat tinggi	223	Sangat Berdebu
Debu sangat tinggi	256	Sangat Berdebu

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3 sensor GP2Y1010AU0F mampu mendeteksi perubahan konsentrasi debu dengan baik. Nilai pembacaan meningkat seiring bertambahnya jumlah partikel debu di udara. Pada kondisi udara bersih, sensor membaca konsentrasi debu di bawah $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan pada kondisi berdebu nilai berada pada rentang $75\text{--}205 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ketika konsentrasi debu melebihi $205 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sistem mengklasifikasikan kondisi sebagai sangat berdebu. *intake fan* dan *exhaust fan* secara otomatis.

Pengujian Sensor DHT22

Pengujian sensor DHT22 bertujuan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mengukur suhu dan kelembapan udara di dalam ruangan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor DHT22 terhadap *thermo-hygrometer* digital sebagai alat pembanding pada beberapa kondisi ruangan.



Gambar 8. Pengujian Suhu & Kelembaban

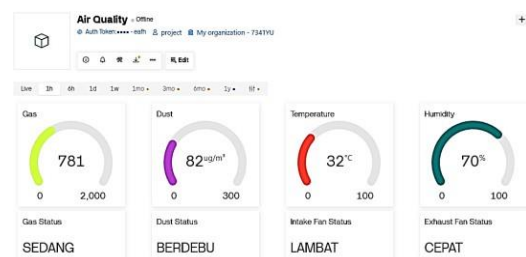
Tabel 4. Tabel Pengujian Sensor Suhu & Kelembaban

DHT 22 Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Thermometer ($^{\circ}\text{C}$)	Error (%)	DH T22 RH (%)	Hygrometer (%)	Error (%)
27.1	27.0	0.37	67	66	1.52
27.3	27.2	0.37	66	66	0.00
27.8	27.7	0.36	65	64	1.56
28.0	28.1	0.36	64	64	0.00
28.5	28.4	0.35	63	62	1.61
28.8	28.7	0.35	62	62	0.00
29.2	29.1	0.34	61	60	1.67
29.5	29.4	0.34	60	60	0.00
29.8	29.7	0.34	59	58	1.72

Berdasarkan data simulasi pada Tabel 4 sensor DHT22 mampu mengukur suhu dan kelembapan dengan hasil yang mendekati alat pembanding. Rata-rata kesalahan pembacaan suhu berada di bawah 0,4%, sedangkan kesalahan kelembapan berada di bawah 2%.

Pengujian Monitoring IoT

Pengujian *monitoring Internet of Things (IoT)* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengirimkan data hasil pembacaan sensor dari ESP32 menuju platform *Blynk* melalui jaringan *Wi-Fi*. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi gas CO_2 , konsentrasi debu, suhu, kelembapan, serta status kecepatan *intake fan* dan *exhaust fan*. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan ESP32 ke jaringan internet dan mengamati tampilan data secara bersamaan pada dashboard *Blynk Web* dan aplikasi *Blynk Mobile*.



Gambar 9. Dashboard Blynk Web



Gambar 10. Dashboard Blynk Mobile

Gambar 9 dan 10 menunjukkan hasil *monitoring* sistem melalui *dashboard Blynk Web* dan *Blynk Mobile*. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh parameter meliputi kadar CO₂, konsentrasi debu, suhu, kelembapan, serta status *intake fan* dan *exhaust fan* berhasil ditampilkan secara real-time. Perbedaan nilai pembacaan pada kedua tampilan disebabkan oleh waktu pengambilan data yang berbeda, sedangkan status *fan* tetap sesuai dengan hasil proses logika *fuzzy*.

Pengujian Logika Fuzzy

Pengujian logika *fuzzy* dilakukan dengan memberikan beberapa kombinasi nilai sensor MQ-135 dan GP2Y1010AU0F sebagai masukan sistem.

Tabel 5. Tabel Pengujian Logika Fuzzy

Debu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	PWM Intake	PWM Exhaust	Kondisi
28	180	0	0	Baik
35	280	125	125	Sedang
40	650	255	255	Buruk
90	180	125	255	Berdebu
110	450	125	255	Berdebu
160	720	255	255	Buruk
210	180	125	255	Sangat Berdebu
240	450	125	255	Sangat Berdebu
280	850	255	255	Sangat Buruk

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh rule *fuzzy* berhasil dijalankan sesuai dengan aturan yang telah dirancang. Semakin tinggi konsentrasi CO₂ dan debu, semakin besar nilai PWM yang dihasilkan sehingga kecepatan *fan* meningkat untuk mempercepat proses sirkulasi udara.

Pengujian PWM Fan

Pengujian PWM *fan* dilakukan untuk mengetahui pengaruh sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dihasilkan ESP32 terhadap kecepatan putaran *fan*. Kecepatan putaran diukur menggunakan *Digital Laser Tachometer* dengan memberikan tanda reflektif pada baling-baling *fan* sehingga kecepatan putar dapat dibaca dalam satuan *Revolutions Per Minute* (RPM).



Gambar 11. Kecepatan PWM Kipas Intake & Outake

Berdasarkan hasil pengujian, kecepatan putaran *fan* berubah sesuai dengan nilai PWM yang diberikan oleh ESP32. Pada kondisi PWM Lambat, kecepatan *fan* terukur sebesar 3460 RPM, sedangkan pada kondisi PWM Cepat, kecepatan meningkat menjadi 4507 RPM. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan nilai PWM menghasilkan peningkatan kecepatan putaran *fan*.

Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem dalam meningkatkan kualitas udara di dalam ruangan setelah proses *monitoring* dan pengendalian otomatis menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan setiap sensor sebelum dan sesudah sistem mengaktifkan *intake fan* dan *exhaust fan*. Parameter yang diamati meliputi suhu, kelembapan, kadar CO₂, dan konsentrasi debu.

Tabel 6. Tabel Keseluruhan Sistem

Sensor	Standar	Sebelum Sirkulasi	Sesudah Sirkulasi	Deviasi (%)
DHT22 (RH)	40–60 %RH	78 %RH	63 %RH	19,2 %
DHT22 (Suhu)	24–30 °C	33 °C	30 °C	9,1 %
MQ135 (CO ₂)	< 1000 ppm	1085 ppm	612 ppm	43,6 %
GP2Y1010A U0F (Debu)	< 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	188 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	69,1 %

Berdasarkan Tabel 6, sistem berhasil meningkatkan kualitas udara setelah proses sirkulasi dilakukan secara otomatis. Konsentrasi CO₂ mengalami penurunan dari 1085 ppm menjadi 612 ppm, atau sebesar 43,6%, sehingga berubah dari kategori Tinggi menjadi Sedang berdasarkan klasifikasi *fuzzy*. Konsentrasi debu juga menurun dari 188 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, atau sebesar 69,1%, sehingga kondisi udara berubah dari Berdebu menjadi Bersih.

Selain itu, suhu ruangan menurun dari 33°C menjadi 30°C, sedangkan kelembapan berkurang dari 78%RH menjadi 63%RH. Penurunan kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa sirkulasi udara yang dihasilkan oleh *intake fan* dan *exhaust fan* membantu mempercepat pertukaran udara di dalam ruangan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem *monitoring* dan kontrol kualitas udara dalam ruangan berbasis *Internet of Things* (IoT)

- menggunakan ESP32 dan metode *Fuzzy Logic Mamdani* berhasil direalisasikan serta mampu melakukan *monitoring* dan pengendalian kualitas udara secara otomatis.
- Sensor MQ-135, Sharp GP2Y1010AU0F, dan DHT22 mampu bekerja dengan baik dalam mendeteksi parameter kualitas udara. Hasil pengujian menunjukkan sensor DHT22 memiliki rata-rata kesalahan pembacaan suhu sebesar 0,32% dan kelembapan sebesar 0,81%, sedangkan sensor GP2Y1010AU0F mampu mengklasifikasikan kondisi udara menjadi bersih, berdebu, dan sangat berdebu sesuai konsentrasi debu yang terukur.
 - Sistem *monitoring* berbasis IoT berhasil mengirimkan dan menampilkan data kadar CO₂, konsentrasi debu, suhu, kelembapan, serta status *fan* secara real-time melalui LCD I2C dan aplikasi *Blynk*, sehingga kondisi kualitas udara dapat dipantau melalui komputer maupun smartphone.
 - Metode *Fuzzy Logic Mamdani* berhasil mengendalikan kecepatan *intake fan* dan *exhaust fan* berdasarkan kondisi kualitas udara. Hasil pengujian menunjukkan kecepatan *fan* sebesar 3460 RPM pada kondisi lambat dan meningkat menjadi 4507 RPM pada kondisi cepat, atau mengalami peningkatan sekitar 30,3%, sehingga sistem mampu meningkatkan sirkulasi udara secara otomatis sesuai perubahan kadar CO₂ dan konsentrasi debu.
- DAFTAR PUSTAKA**
- Cahyono, F. A. D., & I., D. (2024). Rancang bangun sistem pemantauan dan kontrol kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT. *Jurnal Elektronika dan Komputer*, 17(2), 468–474.
- Fadhila, I. P. (2024). Evaluasi suhu dan kelembapan ruang kuliah Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Airlangga. *Healthy Tadulako Journal (Jurnal Kesehatan Tadulako)*, 10(1), 48–55.
- Hanum, L., & E. (2023). Rancang bangun pemantau kualitas udara dalam ruangan berbasis Internet of Things. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 4(2), 619–624.
- Indirwan, N. A. P., Medyati, N., & I., A. (2023). Analisis kadar debu partikulat di jalan protokol Koya Barat Kota Jayapura. *Cenderawasih: Journal of Public Health*, 1(2), 50–57.
- Mendell, M. J., Chen, W., Ranasinghe, D. R., Castorina, R., & Kumagai, K. (2024). Carbon dioxide guidelines for indoor air quality: A review. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 34(4), 555–569. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00694-7>
- Muttaqin, R., Prayitno, W. S. W., Setyaningsih, N. E., & N., U. (2024). Rancang bangun sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT (Internet of Things) dengan sensor DHT11 dan sensor MQ135. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 6(2), 102–115.
- Pamungkas, M. B. A., & I., D. (2024). Monitoring and control system for temperature, humidity, and air quality in LVMDP panel rooms to improve the reliability of LVMDP panel components using fuzzy logic. *Jurnal Komputer, Informasi Dan Teknologi*, 4(2), 1–12.
- Putri, N. A. Z., Ristian, U., & H., R. (2024). Sistem deteksi dan pemantauan kualitas udara dalam ruangan berbasis IoT. *Jurnal JUPITER*, 16(2), 457–468.
- Putri, S. N., & S., D. R. S. (2021). Construction fuzzy logic with curve shoulder in inference system Mamdani. *Journal of Physics: Conference Series*, 1776. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1776/1/012060>
- Rumampuk, G. C., Poekoel, V. C., & R., A. M. (2021). Internet of Things-based indoor air quality monitoring system design. *Jurnal Teknik Informatika*, 17(1), 11–18.
- Sukmawati. (2025). *Alat deteksi polusi udara dalam ruangan tertutup berbasis Internet of Things (IoT)*.
- Zulkarnain, M. R., & I., D. (2024). Sistem monitoring dan pendeteksi kebersihan udara pada kandang peternakan sapi berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Elektronika dan Komputer*, 17(2), 567–579.
- Irbah, N., Nurika, G., & R., A. (2024). Implementation of indoor air quality monitoring systems of particulate matter 2.5 based on the Internet of Things. *Journal of Environmental Health*, 16(3), 266–276. <https://doi.org/10.20473/jkl.v16i3.2024.266-276>