

Sistem Monitoring Kualitas Udara Ruangan Berbasis IoT Dengan Algoritma Fuzzy Logic

Andreas Tandana*, Achmad Ridwan, Tan Della Angelica, Caryn Evelyn Tannesia, Rivanco Winson

Sains dan Teknologi, Teknik Informatika, Universitas Prima Indonesia, Medan, Indonesia

Email: tandanaandreas0@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: tandanaandreas0@gmail.com

Submitted 13-05-2026; Accepted 17-06-2026; Published 30-06-2026

Abstrak

Kualitas udara ruangan sering tidak terpantau secara langsung, padahal paparan gas polutan, debu halus, suhu, dan kelembaban yang tidak ideal dapat meningkatkan potensi gangguan pernapasan. Permasalahan utama yang dihadapi adalah alat pemantauan udara umumnya mahal, sulit diakses, dan menampilkan data teknis yang belum mudah dipahami pengguna. Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring kualitas udara ruangan berbasis Internet of Things (IoT) yang mengolah data sensor menggunakan Fuzzy Logic untuk menghasilkan kategori risiko kualitas udara, bukan diagnosis penyakit. Sistem menggunakan ESP32 DevKit v1, sensor DHT22, MQ-135, dan GP2Y1010AU0F, kemudian mengirim data secara real-time melalui protokol MQTT ke broker Mosquitto dan Python Bridge Server untuk ditampilkan pada dashboard web. Hasil pengujian menunjukkan sensor DHT22 memiliki error maksimum 0,90% untuk suhu dan 2,17% untuk kelembaban, MQ-135 mampu membedakan kondisi udara normal hingga bahaya, GP2Y1010AU0F mendeteksi PM2.5 hingga 89,3 ug/m3, dan komunikasi MQTT stabil dengan latency kurang dari 200 ms. Pengujian Fuzzy Logic menghasilkan skor 15-91 yang memetakan skenario udara bersih, sedang, tidak sehat, hingga bahaya. Kontribusi penelitian ini adalah rancangan prototype monitoring udara berbiaya rendah yang menyajikan informasi kualitas udara secara real-time, mudah dipahami, dan dapat mendukung tindakan pencegahan dini terhadap paparan udara buruk.

Kata Kunci: IoT; Kualitas Udara; Fuzzy Logic; ESP32; MQTT

Abstract

Indoor air quality is often not monitored directly, although exposure to pollutant gases, fine particles, unsuitable temperature, and humidity may increase the potential for respiratory health problems. The main problem is that air monitoring devices are commonly expensive, difficult to access, and present technical data that is not easy for users to understand. This study aims to design an Internet of Things (IoT)-based indoor air quality monitoring system that processes sensor data using Fuzzy Logic to produce air quality risk categories rather than disease diagnosis. The system uses an ESP32 DevKit v1, DHT22, MQ-135, and GP2Y1010AU0F sensors, then sends data in real-time through the MQTT protocol to a Mosquitto broker and Python Bridge Server for visualization on a web dashboard. The testing results show that the DHT22 sensor has a maximum error of 0.90% for temperature and 2.17% for humidity, the MQ-135 can distinguish normal to dangerous air conditions, the GP2Y1010AU0F detects PM2.5 up to 89.3 ug/m3, and MQTT communication remains stable with latency below 200 ms. Fuzzy Logic testing produces scores of 15-91 that map clean, moderate, unhealthy, and dangerous air scenarios. The contribution of this study is a low-cost air monitoring prototype that presents real-time air quality information in an understandable form and can support early prevention actions against poor air exposure.

Keywords: IoT; Air Quality; Fuzzy Logic; ESP32; MQTT

1. PENDAHULUAN

Gangguan kesehatan pernapasan masih menjadi tantangan serius di era modern. Data dan kajian kesehatan menunjukkan bahwa paparan polusi udara berhubungan dengan peningkatan keluhan pernapasan, baik pada masyarakat di wilayah perkotaan maupun lingkungan rumah tangga [1], [2]. Polusi udara tidak hanya berasal dari luar ruangan seperti asap kendaraan dan industri, tetapi juga dari dalam ruangan melalui asap rokok, aktivitas memasak, bahan kimia rumah tangga, debu, ventilasi yang buruk, serta penumpukan karbon dioksida dan senyawa organik volatil [3]. Kondisi tersebut membuat kualitas udara ruangan perlu dipantau karena masyarakat menghabiskan sebagian besar waktunya di dalam ruangan [4], [5].

Permasalahan utama penelitian ini adalah rendahnya kesadaran pengguna terhadap perubahan kualitas udara di sekitar mereka [6]. Alat pemantauan udara yang tersedia di pasaran sering kali memiliki harga relatif tinggi, membutuhkan pemahaman teknis, atau hanya menampilkan angka sensor mentah tanpa memberikan makna kondisi udara bagi pengguna awam [7]. Akibatnya, pengguna sering terlambat menyadari ketika konsentrasi polutan sudah meningkat dan berpotensi menimbulkan gangguan kenyamanan maupun risiko kesehatan pernapasan [8], [9]. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem *monitoring* yang murah, mudah diakses, dan mampu menerjemahkan data sensor menjadi kategori kondisi udara yang jelas.

Penelitian terkait telah menunjukkan bahwa sensor *low-cost* dan *Internet of Things* dapat digunakan untuk memantau parameter udara seperti PM2.5, CO2, dan gas polutan secara *real-time* [10]. Kajian lain menunjukkan bahwa *Fuzzy Logic* sesuai digunakan pada sistem cerdas karena mampu mengolah data yang tidak pasti dan fluktuatif menjadi keputusan linguistik yang lebih mudah dipahami [11]. Penerapan *Fuzzy Logic* pada sistem kendali maupun sistem prediksi juga telah banyak digunakan karena proses pengambilan keputusannya dapat dijelaskan melalui aturan IF-THEN. Namun, sebagian penelitian *monitoring* udara masih berfokus pada visualisasi data sensor, belum menekankan hubungan antara nilai sensor, kategori risiko kualitas udara, dan tindakan peringatan yang mudah dipahami pengguna [12].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini merancang sistem *monitoring* kualitas udara ruangan berbasis ESP32, MQTT, dan *Fuzzy Logic*. Tujuan penelitian adalah membangun *prototype* yang mampu membaca suhu,

kelembaban, gas polutan, dan PM2.5, mengirimkannya secara *real-time* ke *dashboard* web, serta mengolahnya menjadi kategori kualitas udara seperti sangat baik, baik, sedang, tidak sehat, dan bahaya. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi perangkat IoT, komunikasi MQTT, *dashboard* web, serta algoritma *Fuzzy Logic* untuk menghasilkan informasi kualitas udara yang lebih informatif dan berorientasi pada tindakan pencegahan paparan udara buruk.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian rekayasa atau *Engineering* dengan pendekatan *Research and Development* (R&D). Penelitian rekayasa digunakan untuk merancang, membangun, dan mengevaluasi produk teknologi yang menyelesaikan masalah praktis, sedangkan R&D digunakan untuk menghasilkan produk dan menguji kelayakan fungsinya [13], [14]. Produk yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah *prototype* sistem *monitoring* kualitas udara ruangan berbasis IoT yang dilengkapi pemrosesan *Fuzzy Logic* untuk menentukan kategori risiko kualitas udara [15].

2.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun agar proses perancangan alat, penerapan metode, dan pengujian sistem berjalan berurutan. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur mengenai kualitas udara, sensor *low-cost*, IoT, MQTT, dan *Fuzzy Logic*. Tahap berikutnya adalah analisis kebutuhan sistem, meliputi kebutuhan sensor, mikrokontroler, protokol komunikasi, tampilan *dashboard*, serta kategori keluaran yang dibutuhkan pengguna. Setelah itu dilakukan perancangan *hardware* dan *software*, implementasi perangkat, penerapan *Fuzzy Logic*, pengujian sensor dan komunikasi, serta evaluasi hasil untuk memastikan sistem menghasilkan informasi yang sesuai dengan tujuan penelitian.

2.3 Penerapan Algoritma *Fuzzy Logic*

Fuzzy Logic digunakan karena data kualitas udara cenderung fluktuatif dan tidak selalu dapat ditentukan secara tegas melalui batas tunggal. Pada penelitian ini, input *Fuzzy Logic* berasal dari sensor DHT22, MQ-135, dan GP2Y1010AU0F. Parameter suhu dan kelembaban digunakan untuk membaca kenyamanan lingkungan, MQ-135 digunakan sebagai indikator gas polutan, sedangkan GP2Y1010AU0F digunakan untuk membaca konsentrasi PM2.5 [16], [17]. Proses *Fuzzy Logic* terdiri atas fuzzifikasi, pembentukan *rule base*, inferensi, dan defuzzifikasi [18]. Fuzzifikasi mengubah nilai sensor menjadi himpunan linguistik seperti rendah, sedang, dan tinggi. Rule base berisi aturan IF-THEN, misalnya jika nilai gas tinggi dan PM2.5 tinggi maka kategori udara menjadi bahaya. Inferensi digunakan untuk menghitung kekuatan setiap aturan, sedangkan defuzzifikasi menghasilkan skor risiko kualitas udara dalam rentang 0 sampai 100. Skor tersebut kemudian diterjemahkan menjadi kategori sangat baik, baik, sedang, tidak sehat, atau bahaya.

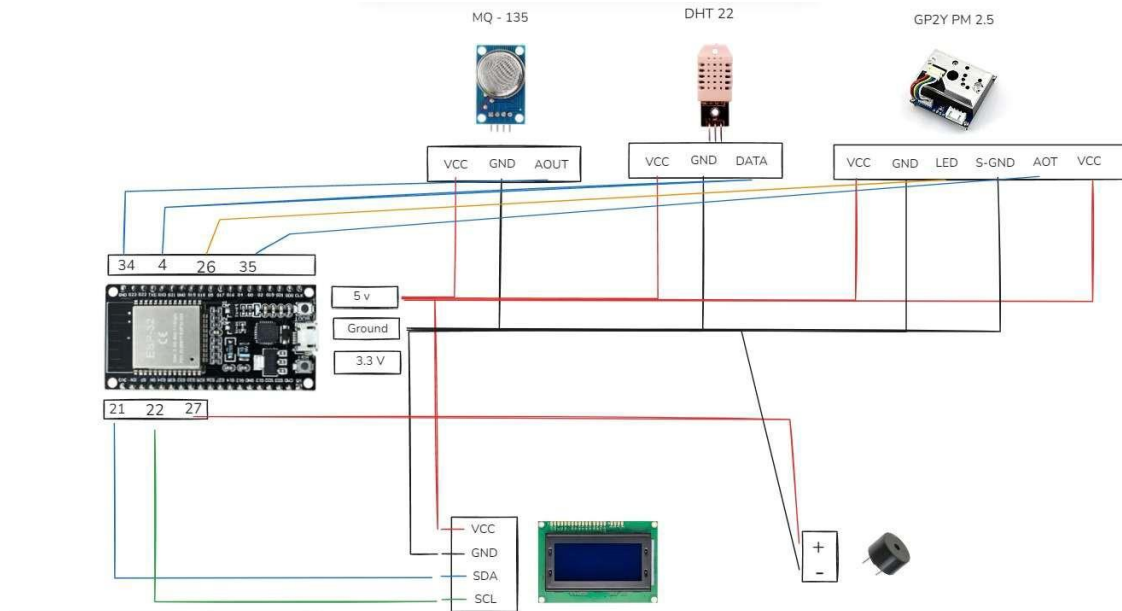
2.4 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan pada empat bagian, yaitu pengujian sensor, pengujian komunikasi MQTT, pengujian fitur *dashboard*, dan pengujian keluaran *Fuzzy Logic* [19]. Sensor DHT22 diuji dengan membandingkan hasil pembacaan terhadap termometer dan higrometer digital. Sensor MQ-135 dan GP2Y1010AU0F diuji pada beberapa kondisi udara, mulai dari udara bersih, ruangan tanpa ventilasi, paparan asap, sampai kondisi setelah ventilasi. Komunikasi MQTT diuji melalui stabilitas koneksi, *latency*, interval pengiriman data, dan kemampuan *reconnect* otomatis. Hasil akhir *Fuzzy Logic* diuji dengan beberapa skenario untuk melihat kesesuaian antara nilai sensor, skor risiko, kategori udara, dan aksi peringatan sistem [20].

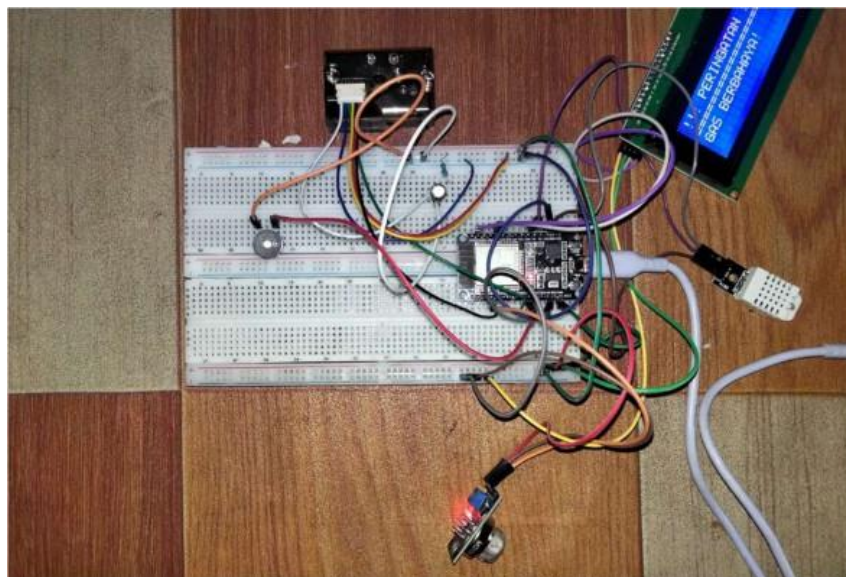
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perancangan *Hardware* dan Arsitektur Sistem

Perancangan *hardware* sistem *monitoring* kualitas udara terdiri atas sensor DHT22, MQ-135, GP2Y1010AU0F, LCD 20x4 I2C, buzzer aktif, dan ESP32 sebagai pengendali utama. Hubungan antar komponen dan alur pengiriman data ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Skema Rangkaian *Hardware* Sistem *Monitoring* Kualitas Udara



Gambar 2. *Prototype Hardware* Sistem *Monitoring* Kualitas Udara

Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan bahwa data sensor dibaca oleh ESP32, dikemas dalam format JSON, kemudian dikirim ke broker Mosquitto melalui protokol MQTT. *Python Bridge Server* bertindak sebagai *subscriber* MQTT sekaligus *WebSocket server* yang meneruskan data ke *dashboard web*. LCD dan *buzzer* tetap terhubung langsung ke ESP32 agar sistem dapat memberi informasi lokal meskipun *dashboard* tidak sedang dibuka. Komponen yang digunakan dalam rancangan *hardware* dipilih berdasarkan kebutuhan pembacaan parameter kualitas udara, ketersediaan pin ESP32, dan kemudahan integrasi. Rincian komponen ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen *Hardware*

No.	Komponen	Spesifikasi	Fungsi
1	ESP32 DevKit v1	Dual-core 240 MHz, WiFi 802.11 b/g/n, ADC 12-bit, 34 GPIO	Mikrokontroler utama dan akuisisi data sensor
2	LCD 20x4 I2C	20 kolom x 4 baris, alamat I2C 0x27, <i>backlight</i> biru	Menampilkan data sensor secara lokal
3	Sensor MQ-135	Deteksi CO ₂ , NH ₃ , benzena, alkohol, dan gas polutan; <i>output</i> analog	Mengukur indikasi gas polutan udara
4	Sensor DHT22	Suhu -40 sampai 80 C; kelembaban 0 sampai 100% RH	Mengukur suhu dan kelembaban udara
5	GP2Y1010AU0F	Sensor debu optik <i>infrared</i> untuk estimasi PM2.5	Mengukur konsentrasi partikel debu halus

No.	Komponen	Spesifikasi	Fungsi
6	Buzzer aktif 5V	Frekuensi 2300 Hz, arus sekitar 30 mA	Alarm ketika kualitas udara berada pada kategori berbahaya

Berdasarkan Tabel 1, ESP32 dipilih karena memiliki WiFi *built-in* dan ADC 12-bit yang cukup untuk membaca sensor analog. DHT22 digunakan untuk mengetahui kondisi suhu dan kelembaban, MQ-135 untuk indikasi gas polutan, GP2Y1010AU0F untuk partikel PM2.5, sedangkan LCD dan *buzzer* digunakan sebagai keluaran lokal. Setelah komponen ditentukan, koneksi pin disusun agar sensor analog menggunakan pin ADC dan perangkat I2C menggunakan pin komunikasi yang sesuai. Konfigurasi koneksi GPIO ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konfigurasi Koneksi GPIO ESP32

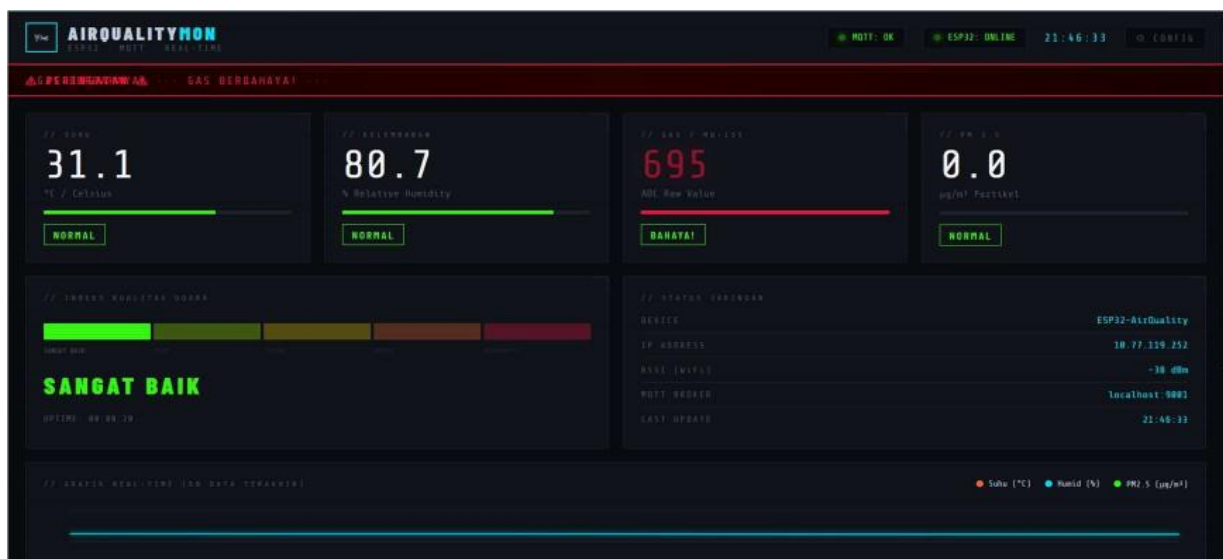
No.	Komponen	Pin Sensor	GPIO ESP32	Tegangan	Keterangan
1	LCD 20x4 I2C	SDA	GPIO 21	3.3/5V	Jalur data I2C
2	LCD 20x4 I2C	SCL	GPIO 22	3.3/5V	Jalur <i>clock</i> I2C
3	LCD 20x4 I2C	VCC	VIN	5V	Sumber daya LCD
4	DHT22	DATA	GPIO 4	3.3V	Data suhu dan kelembaban dengan resistor <i>pull-up</i> 10 kOhm
5	MQ-135	AOUT	GPIO 34	5V	<i>Input</i> analog gas polutan
6	GP2Y1010AU0F	AOUT	GPIO 35	5V	<i>Input</i> analog PM2.5
7	GP2Y1010AU0F	LED	GPIO 26	3.3V	Kontrol pulsa LED sensor debu
8	Buzzer aktif	+	GPIO 27	3.3/5V	<i>Output</i> peringatan kualitas udara
9	Semua komponen	GND	GND	-	<i>Ground</i> bersama sistem

Tabel 2 memperlihatkan bahwa GPIO 34 dan GPIO 35 digunakan untuk sensor analog karena keduanya merupakan *input-only* pin pada ESP32. GPIO 21 dan GPIO 22 digunakan untuk LCD berbasis I2C, sedangkan GPIO 27 digunakan untuk mengontrol *buzzer* sebagai peringatan ketika sistem mendeteksi kategori udara berbahaya.

3.2 Perancangan Software dan Alur Fuzzy Logic

Software sistem dirancang dengan empat lapisan, yaitu *firmware* ESP32 sebagai lapisan akuisisi data, *Mosquitto* sebagai *message broker*, Python Bridge Server sebagai *middleware*, dan *dashboard* web sebagai lapisan *presentasi*. *Firmware* menggunakan pendekatan *non-blocking* berbasis *millis()* agar pembacaan sensor, pengiriman MQTT, pembaruan LCD, dan kontrol *buzzer* tidak saling menghambat. Proses pengolahan data sensor menggunakan *Fuzzy Logic* dijelaskan melalui tahapan fuzzifikasi, *rule base*, inferensi, dan defuzzifikasi agar hubungan antara *input* sensor, aturan *fuzzy*, dan keluaran kategori udara dapat dipahami dengan jelas.

Alur kerja *Fuzzy Logic* menjelaskan bahwa nilai suhu, kelembaban, gas, dan PM2.5 terlebih dahulu difuzzifikasi menjadi himpunan linguistik. Aturan IF-THEN kemudian digunakan untuk menentukan tingkat risiko kualitas udara. Hasil defuzzifikasi berupa skor 0 sampai 100 digunakan oleh *dashboard* untuk menampilkan kategori kualitas udara dan menentukan apakah *buzzer* atau *alert banner* perlu diaktifkan. *Dashboard web* dikembangkan untuk menampilkan data sensor secara *real-time*, grafik historis, indikator kualitas udara, status koneksi, serta log aktivitas. Tampilan *dashboard* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tampilan *Dashboard Web* Sistem Monitoring Kualitas Udara *Real-time*

Gambar 2 memperlihatkan susunan *dashboard* yang terdiri atas kartu metrik, grafik data sensor, indikator AQI, dan *alert banner*. Tampilan ini dibuat agar pengguna dapat mengetahui kondisi udara tanpa harus menafsirkan angka sensor mentah secara manual.

3.3 Hasil Pengujian Sensor

3.3.1 Hasil Pengujian Sensor DHT22

Pengujian DHT22 dilakukan dengan membandingkan suhu dan kelembaban yang terbaca oleh sensor terhadap alat referensi pada beberapa kondisi. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor DHT22

No.	Parameter	Kondisi Uji	Nilai Terbaca	Nilai Referensi	Selisih	Error (%)
1	Suhu	Suhu ruangan normal	28,6 C	28,4 C	0,2 C	0,70%
2	Suhu	Dekat sumber panas	34,2 C	34,0 C	0,2 C	0,59%
3	Suhu	Ruangan ber-AC	22,1 C	22,3 C	0,2 C	0,90%
4	Kelembaban	Ruangan normal	83,7%	82,0%	1,7%	2,07%
5	Kelembaban	Ruangan ber-AC	61,3%	60,0%	1,3%	2,17%
6	Kelembaban	Dekat uap air	91,5%	90,0%	1,5%	1,67%

Berdasarkan Tabel 3., *error* maksimum pengukuran suhu adalah 0,90% dan *error* maksimum kelembaban adalah 2,17%. Nilai tersebut menunjukkan DHT22 masih layak digunakan untuk membaca kondisi lingkungan ruangan pada *prototype* ini.

3.3.2 Hasil Pengujian Sensor MQ-135

Pengujian MQ-135 dilakukan dengan mengekspos sensor pada kondisi udara yang berbeda untuk melihat kemampuan sistem membedakan udara normal, sedang, tinggi, dan bahaya. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Sensor MQ-135

No.	Kondisi Pengujian	Nilai ADC	Status Sistem	Buzzer	Keterangan
1	Udara bersih luar ruangan	87	Normal	Tidak bunyi	<i>Baseline</i> udara segar
2	Udara dalam ruangan normal	134	Normal	Tidak bunyi	Di bawah ambang batas
3	Ruangan tertutup tanpa ventilasi	287	Sedang	Tidak bunyi	CO2 dan VOC mulai meningkat
4	Dekat asap rokok	612	Tinggi	Siaga	Mendekati batas bahaya
5	Dekat asap rokok jarak dekat	954	Bahaya	Bunyi 3 kali	Melewati <i>threshold</i> 400 ADC
6	Dekat bahan kimia alkohol	743	Bahaya	Bunyi 3 kali	Deteksi alkohol/VOC
7	Setelah ventilasi 5 menit	156	Normal	Tidak bunyi	Kembali ke level aman

Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai ADC meningkat ketika sensor berada dekat sumber asap atau bahan kimia. Pada nilai 954 ADC, sistem menampilkan status bahaya dan *buzzer* berbunyi tiga kali. Hasil ini membuktikan bahwa MQ-135 dapat digunakan sebagai indikator kualitatif gas polutan, meskipun kalibrasi PPM masih diperlukan untuk pengukuran absolut.

3.3.3 Hasil Pengujian Sensor GP2Y1010AU0F

Sensor GP2Y1010AU0F diuji pada beberapa kondisi partikel untuk mengetahui perubahan estimasi PM2.5. Hasil pengujian sensor PM2.5 ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Sensor PM2.5 GP2Y1010AU0F

No.	Kondisi Pengujian	PM2.5 (ug/m3)	Kategori AQI	Indikator Web	Keterangan
1	Udara bersih luar ruangan	0,0	Sangat baik	Hijau	Partikel minimal
2	Ruangan normal berventilasi	4,2	Sangat baik	Hijau	Level aman
3	Ruangan tanpa ventilasi	18,7	Baik	Hijau muda	Di bawah 35 ug/m3
4	Dekat kipas berdebu	28,4	Baik	Hijau muda	Mendekati batas baik
5	Dekat asap lilin/dupa	47,6	Sedang	Kuning	Di atas standar harian
6	Simulasi asap tebal	89,3	Buruk	Oranye	Disarankan meningkatkan ventilasi

No.	Kondisi Pengujian	PM2.5 (ug/m3)	Kategori AQI	Indikator Web	Keterangan
7	Setelah ruangan dibersihkan	6,1	Sangat baik	Hijau	Kembali normal

Berdasarkan Tabel 5, nilai PM2.5 meningkat dari 0,0 ug/m3 pada udara bersih menjadi 89,3 ug/m3 pada simulasi asap tebal. Perubahan kategori pada *dashboard* mengikuti peningkatan nilai partikel sehingga pengguna dapat segera mengetahui saat kondisi udara memburuk.

3.3.4 Hasil Pengujian Koneksi MQTT

Pengujian MQTT dilakukan untuk memastikan ESP32, *Mosquitto*, *Python Bridge Server*, dan *dashboard* dapat berkomunikasi stabil dalam jaringan lokal. Hasil pengujian performa koneksi ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Performa Koneksi MQTT

No.	Parameter Pengujian	Hasil	Satuan	Keterangan
1	Waktu koneksi ESP32 ke broker MQTT	3-5	detik	Diukur dari <i>power-on</i> hingga terhubung
2	Interval pembacaan data sensor	1	detik	Sesuai <code>READ_INTERVAL</code>
3	Waktu <i>delay</i> data di <i>dashboard</i>	< 200	ms	<i>Latency WebSocket</i> dalam jaringan lokal
4	Waktu <i>reconnect</i> otomatis	5	detik	<code>MQTT_RECONNECT_INT</code> = 5000
5	Stabilitas koneksi	Stabil	-	Tidak terjadi <i>disconnect</i> setelah pendekatan <i>non-blocking</i>
6	Jumlah data <i>history</i>	60	paket	<i>Buffer</i> data pada <i>Python Bridge Server</i>
7	Jumlah klien browser bersamaan	3	klien	Diuji pada tiga browser berbeda
8	Ukuran paket JSON per kiriman	~180	byte	Berisi data sensor dan metadata

Tabel 6 menunjukkan bahwa sistem mampu terhubung ke *broker* dalam 3 sampai 5 detik, mengirim data setiap 1 detik, dan menampilkan data pada *dashboard* dengan *latency* kurang dari 200 ms. Stabilitas tersebut dicapai setelah *firmware* menggunakan pola *non-blocking* sehingga fungsi `mqttClient.loop()` dapat berjalan konsisten.

3.3.5 Hasil Pengujian Dashboard Web

Dashboard diuji untuk memastikan seluruh fitur utama dapat menampilkan data dan status sistem dengan benar. Hasil pengujian fitur *dashboard* ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Fitur Dashboard Web

No.	Fitur	Status	Keterangan
1	Koneksi MQTT via <i>Mosquitto</i>	Berhasil	Indikator server terhubung tampil pada <i>header dashboard</i>
2	Kartu metrik <i>realtime</i>	Berhasil	Suhu, kelembaban, MQ-135, dan PM2.5 diperbarui berkala
3	Grafik suhu dan kelembaban	Berhasil	Menampilkan data historis dengan garis berbeda
4	Grafik PM2.5 dan gas	Berhasil	Menampilkan perubahan partikel dan gas polutan
5	Indikator AQI berbentuk ring	Berhasil	Warna berubah sesuai kategori kualitas udara
6	<i>Alert banner</i> otomatis	Berhasil	Muncul ketika kategori udara tidak sehat atau bahaya
7	Log aktivitas sistem	Berhasil	Menampilkan status koneksi dan penerimaan data
8	Auto <i>reconnect</i> browser	Berhasil	<i>Dashboard</i> mencoba tersambung kembali saat koneksi terputus
9	Akses multi-klien	Berhasil	Beberapa perangkat dapat membaca data secara bersamaan
10	Responsif multi-device	Berhasil	Tampilan menyesuaikan laptop, tablet, dan <i>smartphone</i>

Berdasarkan Tabel 7, seluruh fitur utama *dashboard* berhasil berjalan. *Dashboard* tidak hanya menampilkan nilai sensor, tetapi juga memberikan indikator visual, grafik historis, log aktivitas, dan peringatan otomatis ketika kualitas udara menurun.

3.4 Hasil Pengujian Algoritma Fuzzy Logic

Pengujian *Fuzzy Logic* dilakukan dengan menggabungkan nilai MQ-135 dan PM2.5 dari beberapa skenario pengujian. Hasil pengujian kategori *fuzzy* ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Algoritma Fuzzy Logic

No.	Skenario	MQ-135	PM2.5	Skor Fuzzy	Kategori	Aksi Sistem
1	Udara bersih luar ruangan	87	0,0	15	Sangat baik	Normal
2	Ruangan berventilasi	134	4,2	22	Sangat baik	Normal

3	Ruangan tanpa ventilasi	287	18,7	48	Sedang	Peringatan ringan
4	Dekat asap rokok	612	47,6	76	Tidak sehat	Buzzer siaga
5	Asap rokok jarak dekat	954	89,3	91	Bahaya	Buzzer dan alert
6	Setelah ventilasi 5 menit	156	6,1	30	Baik	Normal

Tabel 8 menunjukkan bahwa skor *fuzzy* meningkat seiring kenaikan nilai gas dan PM2.5. Skenario udara bersih memperoleh skor 15, sedangkan skenario asap rokok jarak dekat memperoleh skor 91 dan dikategorikan bahaya. Hasil pengujian *fuzzy* memperlihatkan bahwa sistem mampu membedakan kondisi udara berdasarkan tingkat risiko. Dengan demikian, sistem tidak hanya menampilkan angka sensor, tetapi mengubah data menjadi informasi kategori yang dapat langsung digunakan pengguna untuk mengambil tindakan, seperti membuka ventilasi, menjauhi sumber asap, atau membersihkan ruangan.

3.5 Analisis Error dan Akurasi Sensor

Ringkasan akurasi sensor digunakan untuk melihat batas kemampuan sistem berdasarkan pengujian yang telah dilakukan. Ringkasan tersebut ditampilkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Ringkasan Analisis *Error* dan Akurasi Sensor

No.	Sensor	Parameter	Error Maks.	Error Rata-Rata	Standar Akurasi
1	DHT22	Suhu	0,90%	0,73%	+/-0,5 C berdasarkan datasheet
2	DHT22	Kelembaban	2,17%	1,97%	+/-2% RH berdasarkan <i>datasheet</i>
3	MQ-135	Gas polutan (ADC)	-	-	Perlu kalibrasi PPM untuk nilai absolut
4	GP2Y1010AU0F	PM2.5	-	-	Perlu kalibrasi dengan alat referensi

Berdasarkan Tabel 9, DHT22 memiliki *error* yang masih mendekati spesifikasi sensor. MQ-135 dan GP2Y1010AU0F pada penelitian ini digunakan sebagai indikator kualitatif sehingga masih memerlukan kalibrasi lanjutan menggunakan alat referensi tersertifikasi apabila ingin digunakan untuk pengukuran baku mutu udara secara absolut.

3.6 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi IoT, MQTT, dan *Fuzzy Logic* mampu menghasilkan sistem *monitoring* kualitas udara yang lebih informatif dibandingkan sistem yang hanya menampilkan data sensor mentah. Jika dibandingkan dengan penelitian *monitoring* udara berbasis IoT sebelumnya, sistem ini menambahkan proses pengambilan keputusan *fuzzy* sehingga pengguna memperoleh kategori kondisi udara dan peringatan yang lebih mudah dipahami. Pendekatan ini juga sejalan dengan penelitian *Fuzzy Logic* yang menekankan kemampuan metode *fuzzy* dalam menangani data tidak pasti melalui aturan linguistik.

3.6.1 Kelebihan Sistem

- Sistem dapat menampilkan data kualitas udara secara *real-time* melalui *dashboard* web tanpa aplikasi tambahan.
- Arsitektur MQTT memungkinkan data dari ESP32 diterima oleh beberapa klien secara bersamaan.
- Peringatan ganda melalui *buzzer* dan *alert banner* membantu pengguna mengetahui kondisi berbahaya dengan cepat.
- LCD tetap menampilkan data lokal ketika *dashboard* tidak sedang diakses.
- Pendekatan *non-blocking* pada *firmware* membuat pembacaan sensor, pengiriman data, dan *reconnect* otomatis berjalan lebih stabil.

3.6.2 Keterbatasan Sistem

- Sensor MQ-135 memerlukan waktu pemanasan awal sekitar 24 sampai 48 jam agar pembacaan lebih stabil.
- Nilai MQ-135 masih berbentuk ADC dan belum dikonversi menjadi PPM sehingga belum dapat dibandingkan langsung dengan standar baku mutu udara.
- Sensor GP2Y1010AU0F memerlukan kalibrasi dengan alat referensi untuk meningkatkan akurasi nilai PM2.5.
- Data *history* masih tersimpan sementara di memori *Python Bridge Server* dan belum menggunakan *database* permanen.
- Broker MQTT belum dilengkapi autentikasi dan TLS sehingga keamanan komunikasi masih perlu ditingkatkan pada penelitian berikutnya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang *prototype* sistem *monitoring* kualitas udara ruangan berbasis IoT dan *Fuzzy Logic* yang menjawab permasalahan rendahnya akses pengguna terhadap informasi kualitas udara yang mudah dipahami. Sistem mengintegrasikan ESP32 DevKit v1, sensor DHT22, MQ-135, GP2Y1010AU0F, LCD 20x4 I2C, buzzer, MQTT broker Mosquitto, Python Bridge Server, dan *dashboard* web dalam satu arsitektur *monitoring real-time*. Hasil pengujian menunjukkan DHT22 memiliki error maksimum 0,90% untuk suhu dan 2,17% untuk kelembaban, MQ-135 mampu menunjukkan perubahan kondisi gas polutan dari normal sampai bahaya, GP2Y1010AU0F mampu membaca peningkatan

PM2.5 sampai 89,3 ug/m3, dan komunikasi MQTT stabil dengan *latency* kurang dari 200 ms. Pengujian *Fuzzy Logic* menghasilkan skor risiko kualitas udara antara 15 sampai 91 yang dapat diterjemahkan menjadi kategori sangat baik, baik, sedang, tidak sehat, dan bahaya. Dengan demikian, sistem tidak berfungsi sebagai alat diagnosis penyakit pernapasan, melainkan sebagai alat bantu *monitoring* dan peringatan dini terhadap paparan kualitas udara buruk yang dapat berhubungan dengan risiko gangguan pernapasan. Keterbatasan penelitian ini adalah perlunya kalibrasi sensor gas dan PM2.5 menggunakan alat referensi, penyimpanan data jangka panjang, serta peningkatan keamanan MQTT. Pengembangan berikutnya dapat menambahkan database, autentikasi TLS, kalibrasi PPM, dan pengujian lapangan lebih lama agar sistem lebih siap diterapkan pada lingkungan nyata.

REFERENCES

- [1] M. M. A. Haidar, M. Fadhil, J. Jumanthoro, D. S. Aksan, and E. M. Yuspa, "Persepsi Warga Tangerang Selatan Terhadap Polusi Udara Dan Dampaknya Terhadap Kesehatan Pemapasan," *MEDIC NUTRICIA Jurnal Ilmu Kesehatan*, vol. 16, no. 3, 2025, doi: 10.5455/mnj.v1i2.644.
- [2] L. Rahayuwati, I. A. Rizal, T. Pahria, M. Lukman, and N. Juniarti, "Pendidikan Kesehatan tentang Pencegahan Penyakit Kanker dan Menjaga Kualitas Kesehatan," *Media Karya Kesehatan*, vol. 3, no. 1, pp. 59–69, 2020.
- [3] Rokimah, Aliya Masrurah, and Eem Emawati, "Studi Kepustakaan Pembelajaran Lingkungan Hidup Mengenai Peran Tanaman Hias Dalam Menangkal Polusi UdaRA," *CITIZEN: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, vol. 4, pp. 95–114, 2024.
- [4] N. Syamiyah and S. Wahyuni, "Pencemaran Udara Dalam Ruangan (Karbon Dioksida Dan Total Senyawa Organik Volatile) Serta Gangguan Paru Pada Siswa Sd Di DepoK," *Jurnal JOUBAHS*, vol. 1, no. 2, pp. 126–140, 2021.
- [5] C. Padila, "Dampak Polusi Udara terhadap Tingkat Morbiditas Penyakit Pernapasan di Kota Besar," *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, vol. 01, no. 01, pp. 1–7, 2025, [Online]. Available: <https://jurnal.samudrailmu.com/index.php/jkm>
- [6] I. Maulana, A. Pratama, and A. Setiyadi, "Hubungan Peran Kader Kesehatan Dengan Perilaku Penemuan Kasus TBC," *Jurnal Keperawatan*, vol. 15, no. S4, pp. 213–222, 2023, [Online]. Available: <http://journal.stikeskendal.ac.id/index.php/Keperawatan>
- [7] N. Natasya Wonda and Lady Imelda Nope, "Peran Diplomasi Kesehatan Indonesia Dalam Upaya Penanggulangan Tuberkulosis Sebagai Penyakit Menular Global Tahun 2023-2024," *Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, vol. 4, no. 2, pp. 256–265, 2026, doi: 10.60126/jim.v4i2.1478.
- [8] M. Sayyidul Anam and B. S. Agung Pramono, "Clean Air Orbicle: Inovasi Cerdas Dalam Menjaga Kualitas Udara Bagi Masyarakat Olahraga," *JPO: Jurnal Prestasi Olahraga*, vol. 8, no. 3, pp. 954–959, 2025.
- [9] J. Amelia, R. Davita, S. A. Arafah, Y. I. Sede, and A. R. Hidayati, "Dampak Bahaya Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat di Perkotaan," *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, vol. 11, no. 1, p. 132, 2025.
- [10] M. Alamsyah, M. P. Darsana, D. Amalia, Y. Komalasari, and M. R. Fazal, "Faktor- Faktor Yang Mempengaruhi Monitoring Real-Time Pm2.5 Dan Co2 Di Area Terminal Bandar Udara: Low-Cost Sensor, Internet Of Things (IOT) Dan Pengukuran Polutan Udara," *Jurnal Penelitian Politeknik Penerbangan Surabaya*, vol. 9, no. 4, pp. 320–342, 2024.
- [11] H. Aswaldi, "Penerapan Teknologi Internet of Things (IoT) untuk Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan Article history," *Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 40–45, 2025, doi: 10.70716/jocsit.v1i2.225.
- [12] Y. I. NURHASANAH, E. KURNIA, and S. SUTARTI, "Integrasi Logika Fuzzy dengan Teknologi Cerdas: Tinjauan Sistematis atas Peluang, Tantangan, dan Arah Masa Depan," *MIND (Multimedia Artificial Intelligent Networking Database) Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1–17, Jun. 2025, doi: 10.26760/mindjournal.v10i1.1-17.
- [13] Okpatrioka, "Research And Development(R&D)PenelitianYang Inovatif Dalam Pendidikan," *DHARMA ACARIYA NUSANTARA : Jurnal Pendidikan, Bahasa dan Budaya*, vol. 1, no. 1, pp. 86–100, Mar. 2023.
- [14] S. Yasim, A. Dewi Pratiwi, D. Nuraliah, and D. Rianisa Mausili, "Land Acquisition for Public Interest Development: Legal and Regulatory Perspectives in Indonesia," *JSRET (Journal of Scientific, Research, Education, and Technology)*, vol. 4, no. 1, pp. 434–445, 2025.
- [15] Y. Ari Sandy, B. Suprianto, and P. Wanarti Rusimamto, "Sistem Kendali Suhu dan Pengganti Air Otomatis pada Akuarium Menggunakan Fuzzy Logic Controller Berbasis Internet of Things."
- [16] Sherly Andini, Maria Ulfah Siregar, Shofwatul 'Uyun, and Nurochman, "Sistem Inferensi Fuzzy Mamdani Untuk Penghitungan Bonus Karyawan PT. ABC," *JURNAL TEKNIK INFORMATIKA*, vol. 14, no. 2, pp. 179–190, 2021.
- [17] E. S. Rahmadina, B. Irawan, and A. Bahtiar, "Penerapan Algoritma Fuzzy C-Means Pada Data Penjualan Distro," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 8, no. 2, pp. 2348–2354, 2024.
- [18] M. Anisa Tanjung, A. Salsabila, R. Amelia, and A. Puspita Sari, "Sistem Prediksi Pemutusan Kontrak Kerja oleh Karyawan Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani," *Seminar Nasional Informatika Bela Negara (SANTIKA)*, vol. 3, p. 122, 2023.
- [19] X. Liang, G. Wang, M. Renqiang Min, Y. Qi, and Z. Han, "A Deep Spatio-Temporal Fuzzy Neural Network for Passenger Demand Prediction." [Online]. Available: <https://epubs.siam.org/terms-privacy>
- [20] M. C. Carnero, A. Martínez-Corral, and J. Cárcel-Carrasco, "Fuzzy multicriteria evaluation and trends of asset management performance: A case study of Spanish buildings," in *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, Dec. 2023. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02660.