

Pengembangan Prototipe Sistem Pemantauan dan Pengendalian Kualitas Udara Rumah Hunian di Lingkungan Industri Berbasis IoT

Sabila Marista Losya^{1*}, Robby Kurniawan Budhi², Agus Prayitno³

¹ Universitas Widya Kartika/Teknik Informatika

Jalan Sutorejo Prima Utara II No 1 Surabaya, email: sabilalosya@gmail.com

² Universitas Widya Kartika/Teknik Informatika

Jalan Sutorejo Prima Utara II No 1 Surabaya, email: robby@widyakartika.ac.id

³ Universitas Widya Kartika/Teknik Informatika

Jalan Sutorejo Prima Utara II No 1 Surabaya, email: agus.prayitno.sby@gmail.com

ARTICLE INFO

History of the article :

Received 27 April 2026

Received in revised form 10 Juli 2026

Accepted 10 Juli 2026

Available online 18 Juli 2026

Keywords:

Internet of Things; Fuzzy Sugeno Zero-Order; Pengendalian otomatis; Kualitas Udara; Monitoring real-time

* Correspondence:

Telepon :
+6285784358234

E-mail:
sabilalosya@gmail.com

ABSTRACT

Kualitas udara di dalam rumah hunian yang berada di kawasan industri berpotensi menurun akibat paparan gas dan partikel debu sehingga diperlukan sistem pemantauan dan pengendalian yang dapat bekerja secara otomatis. Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe sistem pemantauan dan pengendalian kualitas udara berbasis *Internet of*

Things (IoT) menggunakan metode *Fuzzy Sugeno zero-order*. Kontribusi penelitian terletak pada integrasi tahap *preprocessing* berupa *spike limiter*, *Exponential Moving Average* (EMA), dan *averaging* sebelum proses inferensi sehingga keputusan pengendalian menjadi lebih stabil terhadap fluktuasi pembacaan sensor. Sistem dikembangkan menggunakan sensor MQ-135, *sensor dust* GP2Y1010AU0F, dan DHT22 yang terhubung dengan *mikrokontroler* ESP32, sedangkan hasil pemantauan dikirim ke *platform ThingSpeak*. Pengujian dilakukan pada kamar *mess* di kawasan industri Tangerang selama 7–11 Maret 2026 dengan menghasilkan 88 data hasil pengukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kualitas udara ke dalam kategori Baik, Sedang, dan Buruk menggunakan *rule base Fuzzy Sugeno zero-order*, kemudian mengendalikan kipas angin dan *air purifier* secara otomatis sesuai hasil inferensi. Data hasil pemantauan juga dapat dikirim dan disimpan secara berkala pada *ThingSpeak* sehingga kondisi kualitas udara dapat dimonitor secara *real-time*. Integrasi *preprocessing*, *Fuzzy Sugeno zero-order*, dan pengendalian otomatis dalam satu sistem IoT menunjukkan bahwa prototipe yang dikembangkan dapat digunakan sebagai alternatif sistem pemantauan dan pengendalian kualitas udara pada rumah hunian atau kamar *mess* di kawasan industri.

PENDAHULUAN

Kualitas udara di dalam ruangan merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kesehatan dan kenyamanan penghuni, terutama pada rumah hunian yang berada di sekitar kawasan industri. Aktivitas industri, kendaraan berat, dan pembakaran terbuka menghasilkan berbagai polutan berupa gas maupun partikel debu yang dapat masuk ke dalam ruangan melalui ventilasi atau celah bangunan. Paparan polutan secara terus-menerus berpotensi meningkatkan risiko gangguan pernapasan serta menurunkan kualitas lingkungan dalam ruangan sehingga diperlukan pemantauan kualitas udara secara berkelanjutan [1], [2].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan berbagai sensor lingkungan terhubung ke jaringan internet sehingga proses pemantauan kualitas udara dapat dilakukan secara *real-time*. Selain menyediakan informasi kondisi lingkungan, data hasil pemantauan juga dapat dimanfaatkan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk mengendalikan perangkat seperti kipas angin dan *air purifier* secara otomatis sesuai kondisi udara yang terdeteksi [3], [4]. Dengan demikian, sistem tidak hanya berfungsi sebagai media *monitoring*, tetapi juga mendukung pengendalian kualitas udara secara otomatis.

Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor gas dan sensor *partikulat*. Penelitian sebelumnya telah menerapkan metode *Fuzzy Mamdani* untuk pemantauan kualitas udara, namun belum dilengkapi tahap prapengolahan data sensor maupun mekanisme pengendalian *aktuator* [5]. Penelitian lain mengembangkan sistem *monitoring* kualitas udara menggunakan pendekatan *threshold* dan notifikasi berbasis IoT, tetapi proses pengambilan keputusan masih terbatas pada klasifikasi kondisi udara tanpa penerapan metode *fuzzy* serta belum mengendalikan perangkat secara otomatis [6]. Penelitian lain juga telah memanfaatkan sensor MQ-135 dan sensor *partikulat* untuk pemantauan kualitas udara secara *real-time*, namun sebagian besar masih berfokus pada fungsi *monitoring* atau evaluasi performa sensor secara terpisah [7], [8].

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian pada integrasi antara stabilisasi data sensor, proses pengambilan keputusan, dan pengendalian otomatis dalam satu sistem IoT. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada fungsi *monitoring* atau klasifikasi kualitas udara secara terpisah, sehingga integrasi antara prapengolahan data sensor, proses inferensi *Fuzzy Sugeno*, mekanisme stabilisasi keputusan, dan pengendalian *aktuator* otomatis dalam satu sistem IoT masih belum banyak dibahas. Akibatnya, fluktuasi pembacaan sensor masih berpotensi menyebabkan perubahan status yang terlalu sering sehingga respons *aktuator* menjadi kurang stabil pada kondisi pemantauan secara *real-time*.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan prototipe pemantauan dan pengendalian kualitas udara berbasis IoT dengan mengintegrasikan sensor MQ-135, GP2Y1010AU0F, dan DHT22, tahap prapengolahan data menggunakan *spike limiter* dan *Exponential Moving Average* (EMA), inferensi *Fuzzy Sugeno zero-order*, mekanisme stabilisasi keputusan melalui *confirm counter* dan *hold time*, serta pengendalian otomatis kipas angin dan *air purifier*.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan rangkaian prapengolahan data menggunakan *spike limiter* dan *Exponential Moving Average* (EMA), mekanisme stabilisasi keputusan melalui *confirm counter* dan *hold time*, serta pemanfaatan hasil inferensi *Fuzzy Sugeno zero-order* sebagai dasar pengendalian otomatis *aktuator* dalam satu sistem IoT. Pendekatan tersebut dirancang untuk mengurangi perubahan status akibat fluktuasi pembacaan sensor sehingga keputusan pengendalian menjadi lebih stabil pada kondisi pemantauan secara *real-time*.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe pemantauan dan pengendalian kualitas udara berbasis IoT yang mampu menghasilkan keputusan pengendalian secara lebih stabil melalui penerapan prapengolahan data dan inferensi *Fuzzy Sugeno zero-order*. Sistem yang dikembangkan

diharapkan dapat menjadi alternatif solusi untuk pemantauan dan pengendalian kualitas udara pada rumah hunian di sekitar kawasan industri.

METODE PENELITIAN

1. Desain Penelitian

Penelitian menggunakan metode pengembangan prototipe berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk membangun sistem pemantauan dan pengendalian kualitas udara secara bertahap [9], [10].

2. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada kamar *mess* karyawan di kawasan industri Tangerang yang dipilih sebagai lokasi pengujian karena memiliki potensi paparan polusi udara dari aktivitas industri dan lalu lintas kendaraan.

3. Alat dan Bahan

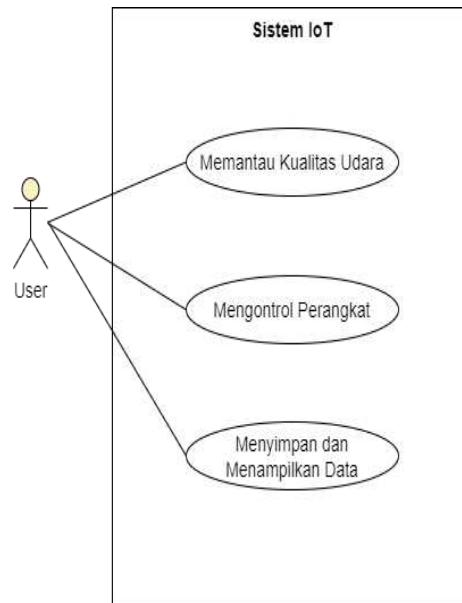
Sistem terdiri atas ESP32, sensor MQ-135 [11], sensor debu GP2Y1010AU0F [12], DHT22, *relay* dua kanal, OLED [13], kipas angin, *air purifier*, dan *platform ThingSpeak* [14].

4. Sumber dan Jenis Data

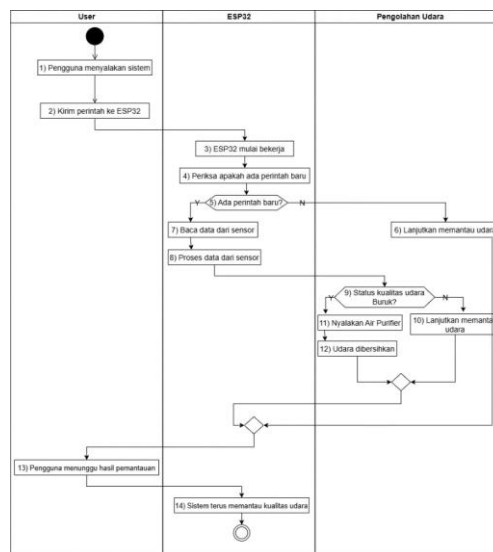
Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh secara langsung dari sensor IoT, meliputi nilai gas (*air quality*) dari sensor MQ-135, suhu dan kelembapan dari sensor DHT22, serta konsentrasi partikel debu dari sensor GP2Y1010AU0F. Data gas dan debu kemudian dipraproses menggunakan metode *spike limiter* dan *Exponential Moving Average* (EMA) untuk mengurangi fluktuasi pembacaan sensor, selanjutnya dirata-ratakan selama interval 30 menit sebelum dikirim ke *platform ThingSpeak* sebagai data pengujian.

5. Perancangan Sistem

Sistem yang dikembangkan terdiri atas tiga bagian utama, yaitu *input*, unit pemrosesan, dan *output*. Perancangan sistem divisualisasikan menggunakan *Use Case Diagram*, *Activity Diagram*, dan Diagram Metode Prototipe untuk menggambarkan interaksi pengguna, alur kerja sistem, serta tahapan pengembangan sistem.



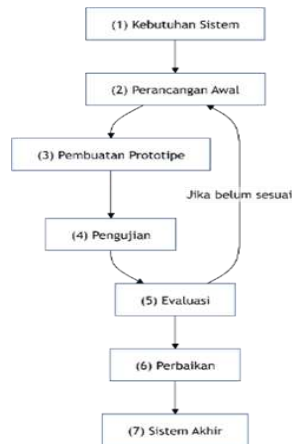
Gambar 1. *Use Case Diagram* menunjukkan interaksi antara pengguna dan sistem



Gambar 2. *Activity Diagram* menggambarkan alur aktivitas dari pemantauan hingga pengendalian kualitas udara

6. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan menggunakan metode pengembangan prototipe yang meliputi tahap identifikasi kebutuhan sistem, perancangan, pembangunan prototipe, pengujian, evaluasi, dan penyempurnaan sistem hingga diperoleh prototipe akhir. Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Diagram Metode Pengembangan Sistem Prototipe Teknik Pengumpulan Data

7. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan secara otomatis menggunakan sensor yang terhubung dengan ESP32. Pembacaan dilakukan setiap 10 detik, kemudian dipraproses dan dirata-ratakan selama interval 30 menit sebelum dikirim ke *platform ThingSpeak* sebagai data pengujian.

8. Teknik Analisis Data

Data hasil pembacaan sensor dipraproses menggunakan *spike limiter* dan *Exponential Moving Average (EMA)*, kemudian diklasifikasikan dengan *crisp threshold* sebelum diproses menggunakan metode *Fuzzy Sugeno zero-order* untuk menentukan pengendalian *actuator* [15].

8.1. Prapengolahan Data (*Preprocessing*)

Data sensor MQ-135 dan GP2Y1010AU0F diproses menggunakan metode *Exponential Moving Average (EMA)* untuk mengurangi fluktuasi pembacaan akibat noise [16]. Perhitungan EMA ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$gasEMA_t = \alpha \cdot gasRaw_t + (1 - \alpha) \cdot gasEMA_{t-1} \quad (1)$$

Dengan α (*alpha*) = 0,3 digunakan sebagai faktor *smoothing* untuk meredam *noise* pada pembacaan sensor. Pada sensor debu GP2Y1010AU0F, data analog terlebih dahulu dikonversi menjadi nilai tegangan dan konsentrasi partikel debu sebelum dilakukan proses penyaringan. Persamaan konversi ditunjukkan pada Persamaan (2) dan Persamaan (3).

$$V_{out} = \frac{ADC}{4095} \times 3.3 \quad (2)$$

$$PM_{raw} = (V_{out} - 0.9) \times 1000 \quad (3)$$

Nilai PM_{raw} selanjutnya diproses menggunakan *spike limiter* dan EMA. Untuk mengurangi perubahan nilai yang terlalu besar akibat gangguan sesaat, sistem menerapkan mekanisme *spike limiter* sebelum proses *filtering*. Persamaan *spike limiter* ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$PM_{limit} = \begin{cases} PM_{sebelumnya} + 200, & \text{jika lonjakan naik} \\ PM_{sebelumnya} - 200, & \text{jika lonjakan turun} \\ PM_{raw}, & \text{jika masih dalam batas} \end{cases} \quad (4)$$

Nilai PM_{limit} dibatasi sebesar ± 200 untuk meredam lonjakan akibat *noise* sebelum proses EMA. Setelah melalui proses *spike limiter*, data sensor debu difilter menggunakan *Exponential Moving Average* (EMA) sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$PM_{EMA} = \alpha \cdot PM_{limit} + (1 - \alpha) \cdot PM_{sebelumnya} \quad (5)$$

Dengan nilai $\alpha = 0.3$ hasil *preprocessing* dirata-ratakan setiap 30 menit sebelum dikirim ke *ThingSpeak* dan digunakan sebagai masukan inferensi. Nilai hasil *preprocessing* dirata-ratakan setiap 30 menit menggunakan Persamaan (6).

$$Avg = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

Nilai rata-rata digunakan sebagai data pengujian yang dikirim ke *ThingSpeak*.

8.2. Penentuan Threshold

Data hasil *preprocessing* diklasifikasikan ke dalam kategori Baik, Sedang, dan Buruk menggunakan pendekatan *crisp threshold*. Pendekatan ini dipilih karena menghasilkan komputasi yang lebih sederhana dan sesuai untuk implementasi *real-time* pada ESP32 [17].

Tabel 1 *Threshold* Klasifikasi Sensor

Parameter	Baik	Sedang	Buruk
Gas MQ-135	<1500	1500–3000	>3000
Debu PM (GP2Y1010AU0F)	<150	150–500	>500

Nilai *threshold* ditentukan berdasarkan karakteristik sensor serta hasil observasi awal.

8.3. Rule Base Fuzzy Sugeno Zero-Order

Metode *Fuzzy Sugeno zero-order* menggunakan aturan IF–THEN dengan konsekuen berupa nilai konstan. Bentuk umum aturan ditunjukkan pada Persamaan (7).

$$IF (x_1 \text{ adalah } A_1) \text{ AND } (x_2 \text{ adalah } A_2) \text{ THEN } z = k \quad (7)$$

Dengan x_1 menyatakan kondisi gas, x_2 kondisi debu, dan k nilai konstan keluaran [18]. Setiap aturan menghasilkan nilai konstan 0 (Baik), 1 (Sedang), atau 2 (Buruk).

Tabel 2 *Rule Base Fuzzy Sugeno Zero-Order*

Gas	Debu	z
Baik	Baik	0
Baik	Sedang	0
Baik	Buruk	1

Sedang	Baik	1
Sedang	Sedang	1
Sedang	Buruk	1
Buruk	Baik	1
Buruk	Sedang	1
Buruk	Buruk	2

8.4. Inferensi dan Defuzzifikasi

Setelah klasifikasi *threshold*, sistem mencocokkan kategori sensor dengan *rule base*. Karena menggunakan *single firing rule*, hanya satu aturan yang aktif sehingga Persamaan (8) disederhanakan menjadi $z = z_i$. Nilai tersebut digunakan sebagai dasar pengendalian *aktuator* [19].

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Z_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (8)$$

Tabel 3 Konversi Nilai *Output* Konstan (z) ke Status Kualitas Udara

Nilai z	Status
0	Baik
1	Sedang
2	Buruk

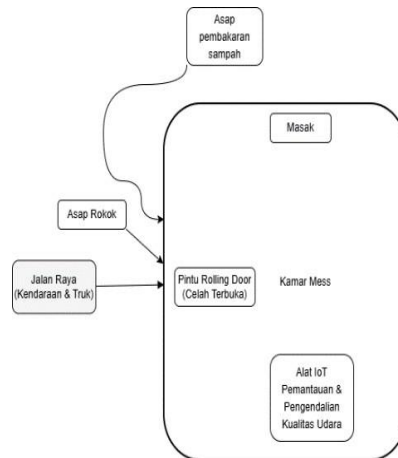
Untuk meningkatkan kestabilan keputusan, sistem menerapkan *confirm counter* sebanyak tiga kali pembacaan berturut-turut dan *hold time* selama dua menit sebelum memperbarui status kualitas udara.

HASIL

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi implementasi sistem, proses inferensi Fuzzy Sugeno zero-order, pengendalian aktuator, serta pengiriman data ke platform ThingSpeak.

1. Implementasi Sistem

Implementasi sistem dilakukan dengan merealisasikan rancangan ke dalam prototipe berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terdiri atas sensor MQ-135, sensor debu GP2Y1010AU0F, sensor DHT22, ESP32, relay, OLED, kipas angin, *air purifier*, dan platform *ThingSpeak*. Sistem mengintegrasikan proses pembacaan sensor, inferensi *Fuzzy Sugeno zero-order*, pengendalian *aktuator*, serta *monitoring* data secara *real-time*.

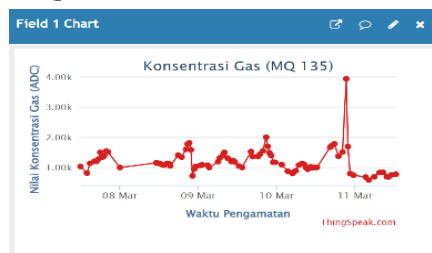
Gambar 4. Ilustrasi Implementasi Sistem pada Lingkungan Kamar *Mess*Gambar 5. Kondisi Aktual Lingkungan Kamar *Mess* sebagai Lokasi Pengujian

Gambar 6. Prototipe Sistem Pemantauan dan Pengendalian Kualitas Udara

2. Hasil Akuisisi Data Sensor

Hasil pengujian diperoleh dari implementasi sistem pada kamar *mess* karyawan di kawasan industri Tangerang. Sensor melakukan pembacaan secara berkala, kemudian data dipraproses menggunakan *spike limiter* dan *Exponential Moving Average* (EMA), dirata-ratakan, dan digunakan sebagai data analisis.

2.1. Hasil Monitoring Sensor MQ-135



Gambar 7. Grafik Hasil *Monitoring* Sensor MQ-135

2.2. Hasil Monitoring Sensor Debu GP2Y1010AU0F



Gambar 8. Grafik Hasil *Monitoring* Sensor Debu

2.3. Hasil Monitoring Suhu dan Kelembapan



Gambar 9. Grafik Hasil *Monitoring* Suhu dan Kelembapan

Hasil *monitoring* menunjukkan nilai gas berada pada rentang 589,10–4054,11, konsentrasi debu 252,98–1906,82, suhu 27,00–32,97°C, dan kelembapan 60–82,40% sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7–9.

2.4. Ringkasan Data Pengujian

Tabel 4. Ringkasan Data Hasil Pengujian

Parameter	Minimum	Maksimum
Gas MQ-135	589,10	4054,11
Debu GP2Y1010AU0F	252,98	1906,82
Suhu (°C)	27,00	32,97
Kelembapan (%)	60,00	82,40

Ringkasan nilai minimum dan maksimum hasil pengukuran setiap parameter selama pengujian ditunjukkan pada Tabel 4. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan proses inferensi *Fuzzy Sugeno zero-order*.

3. Implementasi Metode Fuzzy Sugeno Zero-Order

Implementasi metode *Fuzzy Sugeno zero-order* pada sistem dilakukan melalui tiga tahap, yaitu klasifikasi menggunakan *crisp threshold*, pencocokan terhadap *rule base*, dan penentuan nilai keluaran (z) sebagai dasar pengendalian *aktuator*.

3.1. Implementasi Klasifikasi Threshold

Nilai rata-rata sensor gas dan debu diklasifikasikan ke dalam kategori Baik, Sedang, dan Buruk berdasarkan *threshold* pada Tabel 1. Implementasi klasifikasi pada ESP32 ditunjukkan pada *Listing Program 1*.

```
if (gasAvg < 1500) gasLevel = BAIK;
else if (gasAvg <= 3000) gasLevel = SEDANG; else gasLevel = BURUK;
if (pmAvg < 150) pmLevel = BAIK;
else if (pmAvg <= 500) pmLevel = SEDANG; else pmLevel = BURUK;
```

Listing Program 1 menunjukkan implementasi klasifikasi nilai sensor berdasarkan *threshold* yang telah ditentukan.

3.2. Implementasi Rule Base

Setelah proses klasifikasi, sistem mencocokkan kategori sensor terhadap *rule base Fuzzy Sugeno zero-order*. Implementasi *rule base* ditunjukkan pada *Listing Program 2*.

```
if (gasLevel == BAIK && pmLevel == BAIK) z = 0;
else if (gasLevel == BAIK && pmLevel == SEDANG) z = 0;
else if (gasLevel == BAIK && pmLevel == BURUK) z = 1;
else if (gasLevel == SEDANG && pmLevel == BAIK) z = 1;
else if (gasLevel == SEDANG && pmLevel == SEDANG) z = 1;
else if (gasLevel == SEDANG && pmLevel == BURUK) z = 1;
else if (gasLevel == BURUK && pmLevel == BAIK) z = 1;
else if (gasLevel == BURUK && pmLevel == SEDANG) z = 1;
else
z = 2;
```

Listing Program 2 menunjukkan implementasi sembilan aturan *Fuzzy Sugeno zero-order* yang menghasilkan nilai keluaran 0, 1, atau 2.

3.3. Implementasi Inferensi dan Pengendalian Aktuator

Nilai keluaran (z) digunakan sebagai dasar pembaruan status kualitas udara dan pengendalian *aktuator* melalui mekanisme *confirm counter* dan *hold time*. Implementasinya ditunjukkan pada *Listing Program 3*.

```
const int CONFIRM_REQUIRED = 3;
const unsigned long HOLD_TIME = 120000; if (currentState != pendingState) {
pendingState = currentState; confirmCounter = 1;
}
else {
confirmCounter++;
}
if (confirmCounter >= CONFIRM_REQUIRED && millis() - lastStateChange >= HOLD_TIME)
{ airStatus = pendingState;
lastStateChange = millis(); if (airStatus == BAIK) {
digitalWrite(RELAY_FAN, HIGH); digitalWrite(RELAY_PURIFIER, HIGH);
}
else if (airStatus == SEDANG) { digitalWrite(RELAY_FAN, LOW);
digitalWrite(RELAY_PURIFIER, HIGH);
```

```

}
else {
digitalWrite(RELAY_FAN, LOW); digitalWrite(RELAY_PURIFIER, LOW);
}
}

```

Listing Program 3 menunjukkan implementasi pembaruan status kualitas udara dan pengendalian *relay*. Modul *relay* yang digunakan bersifat *active LOW*, sehingga logika *LOW* menunjukkan aktuator aktif (*ON*), sedangkan *HIGH* menunjukkan aktuator tidak aktif (*OFF*).

4. Hasil Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk memverifikasi proses inferensi, pengendalian *aktuator*, serta pengiriman data ke platform *ThingSpeak*.

4.1. Hasil Inferensi Fuzzy Sugeno Zero-Order

Tabel 5. Hasil Inferensi Fuzzy Sugeno Zero-Order

No	Gas	Debu	Kategori Gas	Kategori Debu	Rule Aktif	z
1	1039,33	424,42	Baik	Sedang	Baik–Sedang	0
2	1208,61	719,33	Baik	Buruk	Baik–Buruk	1
3	1506,37	450,13	Sedang	Sedang	Sedang–Sedang	1
4	4054,11	1906,82	Buruk	Buruk	Buruk–Buruk	2

Contoh perhitungan menggunakan data pertama dengan nilai gas 1039,33 (Baik) dan debu 424,42 (Sedang) mengaktifkan aturan IF Gas = Baik AND Debu = Sedang THEN $z = 0$. Karena menggunakan *single firing rule*, hanya satu aturan yang aktif sehingga berdasarkan Persamaan (8) diperoleh:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Z_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$$z = \frac{1 \times 0}{1}$$

$$z = 0$$

Sehingga status kualitas udara dikategorikan Baik.

Contoh kedua menggunakan data ke-75 dengan nilai gas 4054,11 (Buruk) dan debu 1906,82 (Buruk), sehingga aturan yang aktif adalah IF Gas = Buruk AND Debu = Buruk THEN $z = 2$. Berdasarkan Persamaan (8) diperoleh:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Z_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$$z = \frac{1 \times 2}{1}$$

$$z = 2$$

Sehingga status kualitas udara dikategorikan Buruk.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Inferensi

Status	Jumlah	Persentase
Baik	43	48,86%
Sedang	43	48,86%

Buruk	2	2,27%
Total	88	

4.2. Hasil Pengujian Pengendalian Aktuator

Tabel 7. Hasil Pengujian Pengendalian *Aktuator*

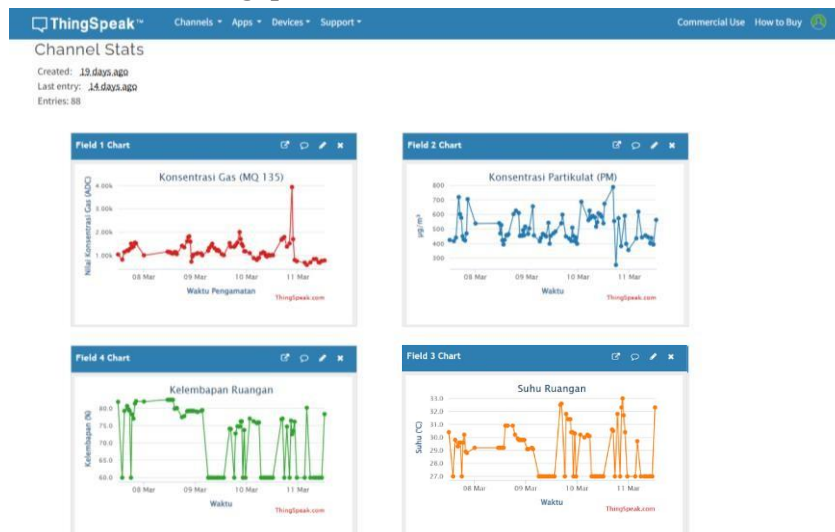
No	Status Kualitas Udara	Kipas	<i>Air Purifier</i>
1	Baik	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>
2	Sedang	<i>ON</i>	<i>OFF</i>
3	Buruk	<i>ON</i>	<i>ON</i>



Gambar 10. Pengujian Respon *Aktuator* pada Kondisi Kualitas Udara: (a) Baik, (b) Sedang, (c) Buruk

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *aktuator* bekerja sesuai status kualitas udara yang dihasilkan sistem. Kondisi Baik menghasilkan kipas dan *air purifier* *OFF*, kondisi Sedang mengaktifkan kipas, sedangkan kondisi Buruk mengaktifkan kedua *aktuator*.

4.3. Hasil Pengiriman Data ke ThingSpeak



Gambar 11. Tampilan Channel *ThingSpeak*

Pengujian menunjukkan bahwa data hasil *monitoring* dikirim ke *platform ThingSpeak* setiap 30 menit menggunakan nilai rata-rata hasil *preprocessing*. Selama periode pengujian tanggal 7–11 Maret 2026 sebanyak 88 data diterima dan tersimpan pada *channel ThingSpeak* sesuai interval pengiriman yang telah ditentukan. Tampilan *channel ThingSpeak* ditunjukkan pada Gambar 11.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian, nilai sensor gas berada pada rentang 589,10–4054,11, sedangkan konsentrasi debu berada pada rentang 252,98–1906,82 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Fluktuasi tersebut dipengaruhi oleh kondisi lokasi pengujian yang berada di tepi jalan kawasan industri dengan lalu lintas kendaraan berat serta ventilasi kamar *mess* yang memungkinkan debu dan asap dari lingkungan luar masuk ke dalam ruangan. Kondisi tersebut menyebabkan perubahan nilai sensor yang cukup cepat sehingga tanpa proses prapengolahan berpotensi menghasilkan perubahan status kualitas udara yang tidak merepresentasikan kondisi sebenarnya. Oleh karena itu, penerapan *spike limiter* dan *Exponential Moving Average* (EMA) berperan mengurangi pengaruh lonjakan sesaat sebelum data digunakan pada proses inferensi.

Data hasil *preprocessing* kemudian diklasifikasikan menggunakan *crisp threshold* dan diproses menggunakan *Fuzzy Sugeno zero-order* melalui mekanisme *single firing rule*. Pendekatan ini dipilih karena hanya satu aturan yang aktif pada setiap proses inferensi sehingga kompleksitas komputasi lebih rendah dibandingkan pendekatan *fuzzy* dengan *membership function* penuh. Karakteristik tersebut sesuai untuk implementasi pada ESP32 yang memiliki keterbatasan sumber daya, sekaligus memungkinkan proses pengambilan keputusan dilakukan secara real-time.

Berdasarkan Tabel 6, kategori Baik dan Sedang masing-masing berjumlah 43 data (48,86%), sedangkan kategori Buruk hanya 2 data (2,27%). Distribusi tersebut menunjukkan bahwa selama periode pengujian kualitas udara lebih sering berada pada kondisi transisi daripada kondisi ekstrem. Status Buruk hanya muncul ketika konsentrasi gas dan debu secara bersamaan melampaui nilai *threshold* sehingga keputusan sistem tidak ditentukan oleh satu parameter saja, melainkan oleh

kombinasi kedua parameter melalui *rule base Fuzzy Sugeno zero-order*. Pendekatan ini menghasilkan keputusan yang lebih representatif dibandingkan penggunaan *threshold* tunggal pada satu sensor.

Pengujian *aktuator* pada Tabel 7 menunjukkan bahwa setiap perubahan status kualitas udara diikuti oleh kondisi aktuator sesuai *rule base* yang telah dirancang. Selain itu, penerapan *confirm counter* sebanyak tiga kali pembacaan berturut-turut dan *hold time* selama dua menit membatasi perubahan status akibat fluktuasi sesaat sehingga frekuensi perpindahan *ON–OFF relay* menjadi lebih rendah. Mekanisme tersebut merupakan bagian dari kontribusi penelitian karena hasil inferensi tidak langsung digunakan untuk mengendalikan *aktuator*, tetapi terlebih dahulu divalidasi melalui mekanisme stabilisasi keputusan agar pengendalian lebih konsisten pada kondisi pemantauan *real-time*.

Data *monitoring* juga dapat dikirim dan disimpan secara berkala pada *ThingSpeak* menggunakan nilai rata-rata hasil *preprocessing* sehingga riwayat kualitas udara dapat diamati secara kontinu. Selama pengujian sempat terjadi proses *reconnect* akibat ketidakstabilan jaringan *WiFi*, namun kondisi tersebut tidak memengaruhi proses inferensi maupun pengendalian karena seluruh proses pengambilan keputusan dijalankan secara lokal pada ESP32. Dengan demikian, koneksi internet hanya digunakan untuk fungsi *monitoring*, sedangkan fungsi pengendalian tetap dapat berlangsung meskipun terjadi gangguan komunikasi.

Untuk menilai kontribusi penelitian terhadap penelitian sebelumnya, dilakukan perbandingan karakteristik sistem sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Aspek	Penelitian Andrianto et al. [5]	Penelitian Afendy et al. [6]	Penelitian Ini
Mikrokontroler	Wemos D1	ESP32	ESP32
Sensor	MQ-135, SDS011	MQ-135, DHT22	MQ-135, GP2Y1010AU0F,

Metode Keputusan	Fuzzy Mamdani	Threshold	DHT22
Preprocessing Data	Tidak ada	Tidak ada	Fuzzy Sugeno Zero-Order Spike limiter, EMA, Averaging
Monitoring IoT	Web Server	Blynk	ThingSpeak
Pengendalian Aktuator	Tidak ada	LED dan notifikasi	Kipas dan air purifier
Implementasi	Monitoring kualitas udara	Monitoring dan notifikasi	Monitoring dan pengendalian otomatis

Tabel 8 menunjukkan bahwa penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada fungsi *monitoring* atau klasifikasi kualitas udara. Penelitian ini menambahkan integrasi *spike limiter*, *Exponential Moving Average* (EMA), *averaging*, *Fuzzy Sugeno zero-order*, serta mekanisme stabilisasi keputusan sebelum pengendalian *aktuator*. Integrasi tersebut menjadi kontribusi utama penelitian karena tidak hanya menghasilkan status kualitas udara, tetapi juga mengurangi perubahan keputusan akibat fluktuasi pembacaan sensor sehingga pengendalian otomatis menjadi lebih stabil pada implementasi IoT secara *real-time*.

Evaluasi pada penelitian ini masih terbatas pada *functional testing* sehingga hasil yang diperoleh menunjukkan kesesuaian implementasi sistem terhadap rancangan, bukan tingkat akurasi sensor maupun keunggulan metode dibandingkan pendekatan lain. Penelitian ini juga belum melakukan validasi sensor menggunakan alat ukur standar, analisis statistik, maupun pengujian komparatif dengan metode lain. Selain itu, pengujian hanya dilakukan pada satu lokasi dengan 88 data, sehingga generalisasi hasil terhadap kondisi lingkungan yang berbeda masih memerlukan penelitian lanjutan.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini menghasilkan prototipe sistem pemantauan dan pengendalian kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) pada kamar *mess* di kawasan industri yang mengintegrasikan proses akuisisi data sensor, *preprocessing*, inferensi *Fuzzy Sugeno zero-order*, pengendalian *aktuator*, serta *monitoring* melalui *ThingSpeak*. Integrasi tersebut memungkinkan proses pemantauan kualitas udara dan pengambilan keputusan dilakukan secara *real-time* dalam satu sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses klasifikasi *crisp threshold*, inferensi *Fuzzy Sugeno zero-order*, pengendalian *aktuator*, dan pengiriman data ke *ThingSpeak* berjalan sesuai dengan rancangan sistem. Tahap *preprocessing* menggunakan *spike limiter* dan *Exponential Moving Average* (EMA) menghasilkan data sensor yang lebih stabil sebelum proses inferensi sehingga keputusan pengendalian menjadi lebih konsisten. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi *preprocessing*, *Fuzzy Sugeno zero-order*, dan pengendalian otomatis dalam satu sistem IoT sebagai pendekatan untuk meningkatkan stabilitas proses pengambilan keputusan pada pemantauan kualitas udara.

Pengembangan selanjutnya disarankan melakukan validasi sensor menggunakan alat ukur standar agar tingkat akurasi pengukuran dapat dievaluasi secara kuantitatif. Pengujian juga perlu dilakukan pada lokasi yang lebih beragam dengan jumlah data dan periode pengamatan yang lebih panjang sehingga representasi kondisi kualitas udara menjadi lebih luas. Selain itu, metode *Fuzzy Sugeno zero-order* dapat dibandingkan dengan metode pengambilan keputusan lainnya, seperti *Fuzzy Mamdani*, untuk mengevaluasi perbedaan kinerja sistem. Pengembangan lebih lanjut juga dapat mengintegrasikan *membership function* penuh maupun pendekatan berbasis *machine learning* guna mendukung penentuan kategori kualitas udara serta optimasi proses pengambilan keputusan secara otomatis.

REFERENSI

- [1] L. García, A. J. Garcia-Sanchez, R. Asorey-Cacheda, J. Garcia-Haro, and C. L. Zúñiga-Cañón, “Smart Air Quality Monitoring IoT-Based Infrastructure for Industrial Environments,” *Sensors*, vol. 22, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/s22239221.
- [2] O. Isinkaralar, M. Rajfur, K. Isinkaralar, and P. Świsłowski, “Contamination degree and health implications of indoor air pollution: Operating field measurements in market environments,” *Sci. Total Environ.*, vol. 969, p. 178946, 2025, doi: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178946.
- [3] A. Kosta, I. Lili, and E. Xhina, “Comparison and Evaluation of Air Quality Monitoring Methods Using Iot Devices,” *Br. J. Environ. Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–11, Mar. 2024, doi: 10.37745/bjes.2013/vol12n3111.
- [4] M. N. A. Ramadan, M. A. H. Ali, S. Y. Khoo, M. Alkhedher, and M. Alherbawi, “Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 283, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116856.
- [5] R. Andrianto, N. Purnomo, and Y. Irawan, “Application of Fuzzy Logic Mamdani in IoT-Based Air Quality Monitoring Systems,” vol. 13, no. 5, pp. 7121–7133, 2024, doi: 10.33022/ijcs.v13i5.4291.
- [6] J. Afendy, “Perancangan Sistem Monitoring dan Notifikasi Otomatis Kualitas Udara Ruang Kelas Berbasis Internet of Things (IOT),” vol. 20, no. 1, pp. 60–71, 2026, doi:10.35457/antivirus.v20i1.5313.
- [7] E. Chiu, J. Welman Simatupang, R. Hakiki, and F. Maratur Sidjabat, “Prototype of Air Quality Sensor for Gas Pollutants Monitoring System in Industrial and Residential Estates,” *J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 17, no. 1, pp. 96–123, 2021, doi: 10.25105/jetri.v17i1.9812.
- [8] T. Blinova, S. S. Chauhan, T. Singla, S. Bansal, A. Mittal, and V. S. Yellanki, “Performance Evaluation of IoT Sensors in Urban Air Quality Monitoring: Insights from the IoT Sensor Performance Test,” in *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, Jan. 2024. doi: 10.1051/bioconf/20248601088.
- [9] F. Prasajo, A. K. Nugroho, and S. Heranurweni, “Pengaruh Desain Modular Terhadap Stabilitas Suhu Dan Reduksi Kebisingan Pada Incu Analyzer,” *J. Transform.*, vol. 23, no. 2 SE-Artikel, pp. 155–163, 2025, doi: 10.26623/transformatika.v23i2.12330.
- [10] D. Múnera, V. Diana, J. Aguirre, and N. G. Gómez, “IoT-based air quality monitoring systems for smart cities: A systematic mapping study,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 3470–3482, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i4.pp3470-3482.
- [11] P. Pendriadi, S. Meliala, M. A. Muthalib, and A. Bintoro, “Studi Kadar Gas Amonia Menggunakan Sensor Amonia Mq135 Menggunakan Spreadsheet Berbasis Internet of Thing (Iot),” *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 25, no. 2, pp. 75–84, 2023, doi: 10.14710/transmisi.25.2.75-84.
- [12] V. K. Tran, B. T. Thai, H. Pham, V. K. Nguyen, and V. K. Nguyen, “A Proposed Approach to Utilizing Esp32 Microcontroller for Data Acquisition,” *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 56, no. 4, pp. 474–488, 2024, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.4.4.
- [13] A. Choudhary, L. Saini, A. Ahmad, H. Banerjee, and F. Gazi, “Design and Fabrication of an IoT based Air Purifier using HEPA Filter,” in *2023 11th International Conference on Internet of Everything, Microwave Engineering, Communication and Networks (IEMECON)*, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/IEMECON56962.2023.10092366.
- [14] Muarif, Ade Sumaedi, and Mardiansyah, “Monitoring Suhu Ruangan Server Jaringan Hostpot Berbasis Mikrokontroler NodeMCU ESP8266 Dengan Thingspeak,” *J. Inf. Comput.*, vol. 2,

-
- no. 1, pp. 17–27, 2024, doi: 10.32493/jicomisc.v2i1.38638.
- [15] F. T. Nosa, D. Kurniasari, A. Amanto, and W. Warsono, “Robusta London Coffee Price Forecasting Analysis Using Recurrent Neural Network – Long Short Term Memory (RNN – LSTM),” *J. Transform.*, vol. 20, no. 2 SE-Artikel, pp. 30–41, doi: 10.26623/transformatika.v20i2.5482.
- [16] R. Muammar, “Penerapan Metode Exponential Moving Average (Ema) sebagai Noise Reduction untuk Pembacaan Sinyal Analog pada Mikrokontroler,” *J. EEICT (Electric Electron. Instrum. Control Telecommun.)*, vol. 5, Apr. 2022, doi: 10.31602/eeict.v5i1.6859.
- [17] A. T. Achyar, R. Hidayati, and K. Sari, “Sistem Klasifikasi Kualitas Udara dengan Integrasi Sensor menggunakan Metode K-Nearest Neighbor,” *JEPIN, J. Edukasi dan Penelit. Inform.*, vol. 11, no. 2, pp. 185–192, 2025, doi: 10.26418/jp.v11i2.90728.
- [18] I. Nur Islamiyati, R. A. Krisdiawan, and A. Wahyuddin, “Implementation of the Sugeno Fuzzy Algorithm for a Dynamic Scoring System in an Educational Game on Fraction and Decimal Operations,” *SISINFO J. Sist. Inf. dan Inform.*, vol. 7, no. 2 SE-Articles, pp. 240–255, Aug. 2025, doi: 10.37278/sisinfo.v7i2.1302.
- [19] R. F. Panjaitan, R. Wirayuda, and K. Shaleh, “Prediksi Produksi Air Minum dalam Kemasan Menggunakan Metode Fuzzy Sugeno Berdasarkan Permintaan Mingguan dan Stok Bahan Baku” *J. Ris. Sist. Inf. dan Tek. Inform.*, vol. 3, no. 6, pp. 307–317, Nov. 2025, doi: 10.61132/merkurius.v3i6.1231.