

Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT dan Fuzzy Mamdani

Heni Puspita¹, Sri Desy Siswanti², Kevin³

^{1,2,3}Teknik Elektro, Universitas Nurtanio, Bandung

Email : sridesy@unnur.ac.id^{1,2,3}

ABSTRAK

Kualitas udara yang buruk merupakan permasalahan lingkungan yang berdampak langsung terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, khususnya di wilayah perkotaan dengan tingkat emisi tinggi dari kendaraan dan aktivitas industri. Sistem pemantauan kualitas udara konvensional umumnya memiliki keterbatasan dalam hal cakupan wilayah, kecepatan akses data, dan biaya operasional. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang dilengkapi dengan metode Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani sebagai sistem klasifikasi kualitas udara. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang diintegrasikan dengan sensor MQ-2 dan MQ-7 untuk mendeteksi konsentrasi gas NO₂ dan CO. Data sensor dikirim secara real-time ke platform ThingSpeak dan diolah menggunakan logika fuzzy Mamdani dengan tiga kategori keanggotaan (rendah, sedang, tinggi) pada input dan tiga kategori ISPU pada output (baik, sedang, tidak sehat). Pengujian dilakukan di dua lokasi padat penduduk di Kota Bandung, yaitu Mikro Mall dan Kopo Elok. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kualitas udara secara responsif dan akurat berdasarkan variasi nilai polutan. Perubahan nilai CO dan NO₂ terbukti memengaruhi nilai ISPU sesuai aturan fuzzy yang ditetapkan. Sistem ini dinilai efektif, murah, dan dapat menjadi solusi alternatif untuk sistem pemantauan kualitas udara yang edukatif dan adaptif.

Kata Kunci : ESP32, fuzzy Mamdani, Internet of Things, kualitas udara

1. PENDAHULUAN

Kualitas udara yang buruk menjadi tantangan lingkungan global dengan dampak luas terhadap kesehatan, pertanian, dan perubahan iklim. Peningkatan konsentrasi polutan seperti CO, NO₂, dan PM_{2.5} terbukti berkorelasi dengan meningkatnya penyakit pernapasan dan kematian dini, terutama di wilayah perkotaan (Dewi, T. R., & Fadilah, 2023). Di Indonesia, permasalahan ini diperburuk oleh pertumbuhan populasi, urbanisasi, serta tingginya aktivitas kendaraan dan industri (Nugroho, Y. A., & Wahyudi, 2019). Sistem pemantauan berbasis stasiun tetap masih memiliki keterbatasan cakupan, keterkinian data, dan biaya operasional yang tinggi (Kurniawan, A., Putra, R. A., & Pratama, 2021).

Internet of Things (IoT) menjadi solusi potensial karena memungkinkan pemantauan parameter polusi secara kontinu dan daring (Wijaya, R., & Sari, 2020; Zhang, Y., Liu, L., & Wang, 2020). Penggunaan NodeMCU/ESP8266 dengan sensor gas MQ series terbukti efektif untuk monitoring skala kecil dan menengah (Astuti, A. W., & Riyanto, 2022)(Yulianto, M., & Susanti, 2024). Namun, data sensor yang fluktuatif memerlukan sistem pengambilan keputusan cerdas. Fuzzy Logic mampu menangani ketidakpastian melalui aturan if-then yang fleksibel (Chen, J., Ma, Y., & Zhao, 2023)(Kumar, P., Singh, R., & Sharma, 2021). Integrasi IoT dan Fuzzy Logic

terbukti meningkatkan akurasi klasifikasi kualitas udara sesuai standar ISPU (Hasan, M. R., & Chowdhury, 2019) (Xu, B., Yu, M., & Chen, 2021).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan merancang sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan metode Fuzzy Logic secara real time untuk mengklasifikasikan kondisi udara ke dalam kategori ISPU serta mendukung mitigasi dan peringatan dini.

2. METODE

Metode Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) untuk merancang, mengembangkan, dan menguji prototipe sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dan Fuzzy Logic dalam skala laboratorium yang mampu memantau serta mengklasifikasikan kualitas udara secara real-time. Pendekatan yang digunakan adalah studi kasus di dua lokasi strategis di Kota Bandung, yaitu kawasan sekitar Mikro Mall dan Kopo Elok. Pengujian pertama dilakukan pada Minggu, 15 September 2024 pukul 06.50 WIB di sekitar Mikro Mall yang merupakan kawasan komersial padat dengan aktivitas kendaraan tinggi, namun saat pengujian kondisi cuaca cerah dan lalu lintas masih relatif sepi. Pengujian kedua dilakukan pada hari yang sama pukul 12.47 WIB di kawasan Kopo Elok, Jalan Galaxy Selatan RT 06 RW 05, Kelurahan Cirangrang, Kecamatan Babakan Ciparay, yang merupakan kawasan padat penduduk dan berada di lingkungan industri. Pemilihan kedua lokasi dan waktu yang berbeda bertujuan untuk merepresentasikan variasi kondisi lingkungan perkotaan serta memperoleh data yang lebih beragam dan relevan dalam pemantauan kualitas udara secara real-time.

2.1 Penelitian Terkait

Pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan teknologi dan metode klasifikasi. Penelitian (Arief, M. R., & Lestari, 2019) mengembangkan sistem monitoring berbasis Arduino dengan sensor gas, namun belum dilengkapi metode kecerdasan buatan. Penelitian (Fahmi, R., & Saputra, 2022) menerapkan fuzzy logic untuk klasifikasi kualitas udara, tetapi belum mengacu pada standar ISPU dan belum terintegrasi dengan visualisasi real-time. Selanjutnya (Zhang, Y., Liu, L., & Wang, 2020) mengusulkan sistem berbasis ESP8266 dan fuzzy inference tanpa klasifikasi ISPU dan hanya diuji secara terbatas, sedangkan pada penelitian (Kurniawan, A., Putra, R. A., & Pratama, 2021) membangun sistem NodeMCU berbasis fuzzy Mamdani untuk lingkungan perkotaan namun belum menyediakan visualisasi menyeluruh dan portable. Penelitian (Xu, B., Yu, M., & Chen, 2021) serta (Kumar, P., Singh, R., & Sharma, 2021) menggunakan fuzzy logic dalam pengambilan keputusan kualitas udara tanpa perbandingan antar metode dan belum berorientasi pada sistem edukatif berbasis masyarakat. (Hidayat, M., & Ardiansyah, 2023) melakukan studi komparatif Mamdani dan Sugeno tetapi hanya pada aspek algoritmik tanpa implementasi IoT nyata, kemudian (Maulana, R., & Aditya, 2021) mengembangkan sistem portable berbasis NodeMCU dan sensor MQ tanpa integrasi fuzzy logik, Sementara (Kartika, A. T., & Handoko, 2021) menerapkan klasifikasi ISPU dengan fuzzy Mamdani, namun belum membandingkan metode lain serta belum menyediakan platform visualisasi real-time yang dapat diakses masyarakat.

2.2 Indeks Standar Pencemar Udara (Kehutanan, 2020)

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) berkomitmen menyediakan informasi mutu udara yang tepat dan akurat sebagai upaya pengendalian pencemaran udara, dibuktikan dengan peningkatan jumlah stasiun pemantauan otomatis kontinu yang ditargetkan mencapai 38 stasiun pada tahun 2020. Informasi mutu udara tersebut disampaikan dalam bentuk Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), yaitu angka tanpa satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu berdasarkan dampaknya terhadap kesehatan manusia, nilai estetika, dan makhluk hidup lainnya. Khusus di daerah rawan kebakaran hutan dan lahan, ISPU berfungsi sebagai sistem peringatan dini bagi masyarakat sekitar. Penyusunan ISPU bertujuan memberikan keseragaman dan kemudahan pemahaman informasi mutu udara pada lokasi dan waktu tertentu serta menjadi bahan pertimbangan dalam upaya pengendalian pencemaran udara oleh pemerintah pusat dan daerah, dengan perhitungan yang didasarkan pada nilai ISPU batas atas dan bawah, ambien batas atas dan bawah, serta konsentrasi ambien hasil pengukuran.

Pada persamaan (1), I merupakan ISPU terhitung, I_a adalah ISPU batas atas, I_b adalah ISPU batas bawah, X_a adalah konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), X_b adalah konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), X_x adalah konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \tag{1}$$

Tabel 1. Konversi Nilai Konsentrasi Parameter ISPU

ISPU	24 Jam PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam HC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0 - 50	50	15,5	52	4000	120	80	45
51 - 100	150	55,4	180	8000	235	200	100
101 - 200	350	150,4	400	15000	400	1130	215
201 - 300	420	250,4	800	30000	800	2260	432
>300	500	500	1200	45000	1000	3000	648

Keterangan:

- Data pengukuran selama 24 jam secara terus-menerus.
- Hasil perhitungan ISPU parameter partikulat (PM2.5) disampaikan tiap jam selama 24 jam.
- Hasil perhitungan ISPU parameter partikulat (PM10), sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), ozon (O₃), nitrogen dioksida (NO₂) dan hidrokarbon (HC), diambil nilai ISPU parameter tertinggi dan paling sedikit disampaikan setiap jam 09.00 dan jam 15.00.

Tabel 2. Konversi Nilai Konsentrasi Parameter ISPU

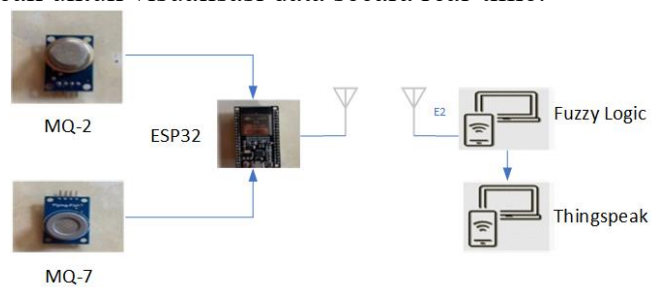
Rentang	Kategori	Penjelasan
1-50	Baik	Tingkat mutu udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan dan tumbuhan
51-100	Sedang	Tingkat mutu udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan.
101-200	Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan.
201-300	Sangat Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar.
301+	Berbahaya	Tingkat mutu udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat.

2.3 Perancangan Sistem

Perancangan sistem dalam penelitian ini dilakukan 2 tahap yaitu perancangan sistem perangkat keras dan perancangan perangkat lunak.

2.3.1 Perancangan Perangkat Keras

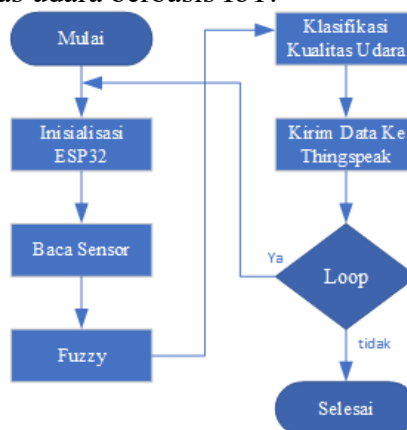
Perangkat keras penelitian ini terdiri dari sensor MQ-2, sensor MQ-7, dan mikrokontroler ESP32 (Gambar 1). Sensor MQ-2 digunakan untuk mendeteksi asap serta gas mudah terbakar seperti LPG dan metana, sedangkan MQ-7 untuk mendeteksi karbon monoksida (CO). Kedua sensor terhubung ke ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan dan pengirim data melalui WiFi ke sistem logika fuzzy untuk klasifikasi kualitas udara serta ke platform IoT ThingSpeak untuk visualisasi data secara real-time.



Gambar 1. Perancangan Perangkat Keras

2.3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem ini terdiri dari pemrograman mikrokontroler ESP32 dan implementasi logika fuzzy untuk klasifikasi kualitas udara. Pemrograman dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan tahapan kerja yang ditunjukkan pada gambar 2, yang menggambarkan diagram alir proses sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT.

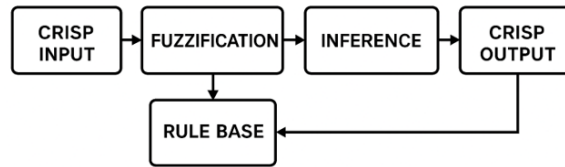


Gambar 2. Perancangan Perangkat Lunak

2.3.3 Fuzzy Mandani

Pada tahap ini dilakukan penentuan variabel input dan output, pembentukan himpunan fuzzy, penyusunan rule base, serta pemilihan metode inferensi dan defuzzifikasi. Proses tersebut ditunjukkan pada gambar 3 sebagai

alur logika fuzzy, dimulai dari input crisp, melalui tahap fuzzifikasi dan inferensi, hingga menghasilkan output crisp melalui defuzzifikasi.



Gambar 3 Tahapan Fuzzy Mandani

1. Fuzzifikasi dan Keanggotaan

Dalam menyusun proses fuzzifikasi berdasarkan grafik CO, NO₂, dan nilai ISPU menggunakan metode Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani, langkah pertama yang harus dilakukan adalah mendefinisikan:

- a. Variabel input (CO dan NO₂)
- b. Variabel output (Hasil ISPU)
- c. Himpunan fuzzy (linguistik) untuk masing-masing variabel
- d. Proses fuzzifikasi (konversi nilai crisp menjadi derajat keanggotaan fuzzy)

Tabel 3. Variabel Input dan Variabel Output

Variabel	Rentang Nilai	Himpunan Fuzzy
Input 1: CO	4000 – 5000	Rendah, Sedang, Tinggi
Input 2: NO₂	540 – 720	Rendah, Sedang, Tinggi
Output: ISPU	104 – 122	Baik, Sedang, Tidak Sehat

Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem Fuzzy Mamdani menggunakan dua variabel input, yaitu CO (4000–5000) dan NO₂ (540–720), serta satu variabel output, yaitu ISPU (104–122). Setiap variabel dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy: rendah, sedang, dan tinggi untuk input, serta baik, sedang, dan tidak sehat untuk output. Pembagian ini menjadi dasar proses fuzzifikasi dan penyusunan aturan fuzzy. Fungsi keanggotaan yang digunakan untuk variabel CO, NO₂, dan hasil ISPU berbentuk segitiga, sesuai dengan metode Fuzzy Mamdani. Rincian fungsi keanggotaan masing-masing variabel ditampilkan pada Tabel 4 (CO), Tabel 5 (NO₂), dan Tabel 6 (ISPU).

Tabel 4. Himpunan Fungsi Keanggotaan Untuk CO

Himpunan Fuzzy	Range (x)	Titik Segitiga (a, b, c)
Rendah	4000 – 4400	(4000, 4000, 4400)
Sedang	4300 – 4700	(4300, 4500, 4700)
Tinggi	4600 – 5000	(4600, 5000, 5000)

Tabel 5. Himpunan Fungsi Keanggotaan Untuk NO₂

Himpunan Fuzzy	Range (x)	Titik Segitiga (a, b, c)
Rendah	540 – 630	(540, 540, 630)
Sedang	600 – 690	(600, 645, 690)
Tinggi	660 – 720	(660, 720, 720)

Tabel 6. Himpunan Fungsi Keanggotaan Output Hasil ISPU

Himpunan Fuzzy	Range (x)	Titik Segitiga (a, b, c)
Baik	104 – 112	(104, 104, 112)
Sedang	110 – 118	(110, 114, 118)
Tidak Sehat	116 – 122	(116, 122, 122)

2. Inferensi dan Aturan Fuzzy Mamdani

Inferensi dan aturan fuzzy Mamdani pada penelitian ini digunakan untuk menentukan nilai output ISPU berdasarkan hasil fuzzifikasi input CO dan NO₂. Setiap kombinasi nilai fuzzy kedua parameter dirumuskan dalam aturan logika IF-THEN, lalu diproses menggunakan metode Mamdani untuk menghasilkan keputusan akhir berupa kategori kualitas udara. Aturan-aturan tersebut disajikan pada tabel 7

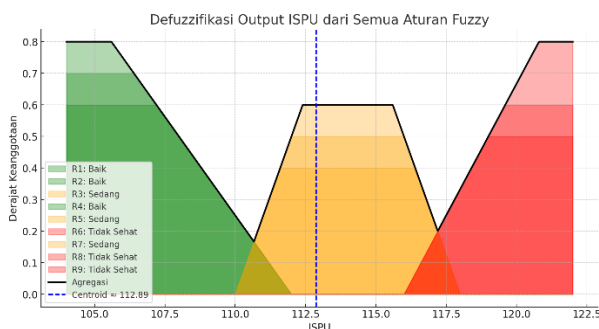
Tabel 7. Inferensi dan Aturan Mamdani

Aturan	CO	NO ₂	Hasil ISPU
R1	Rendah	Rendah	Baik
R2	Rendah	Sedang	Baik
R3	Rendah	Tinggi	Sedang
R4	Sedang	Rendah	Baik
R5	Sedang	Sedang	Sedang
R6	Sedang	Tinggi	Tidak Sehat
R7	Tinggi	Rendah	Sedang
R8	Tinggi	Sedang	Tidak Sehat
R9	Tinggi	Tinggi	Tidak Sehat

3. Defuzzifikasi (Metode Centroid)

Proses defuzzifikasi pada studi ini menggunakan metode Centroid untuk memperoleh nilai akhir (crisp). Hasilnya ditampilkan pada gambar 4 yang memperlihatkan proses defuzzifikasi output ISPU berdasarkan seluruh aturan fuzzy dengan metode Mamdani.

Sumbu horizontal menunjukkan rentang nilai ISPU (104–122), sedangkan sumbu vertikal menunjukkan derajat keanggotaan kategori *baik* (hijau), *sedang* (oranye), dan *tidak sehat* (merah). Area berwarna merupakan hasil agregasi sembilan aturan fuzzy (R1–R9). Melalui metode centroid, diperoleh nilai crisp sebesar 112,89 (ditandai garis biru putus-putus), yang merepresentasikan tingkat kualitas udara berdasarkan kombinasi nilai input CO dan NO₂ yang diproses sistem.



Gambar 4. Hasil Proses Defuzzifikasi Semua Aturan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil penelitian dan pengujian sistem. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja *Fuzzy Inference System* (FIS) metode Mamdani dalam menentukan nilai ISPU berdasarkan input konsentrasi gas CO dan NO₂. Skenario pengujian menggunakan pendekatan studi kasus secara langsung di lapangan dengan

data real-time dari dua lokasi berbeda di Kota Bandung, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Inferensi dan Aturan Mamdani

No.	Skenario	Waktu & Lokasi	Kondisi Lingkungan	Data Input (CO/NO ₂)
1	Pagi Hari di Kawasan Mikro Mall	Minggu, 15 September 2024, pukul 06.50 WIB Mikro Mall, Kota Bandung	Cuaca cerah, lalu lintas belum padat, aktivitas warga mulai meningkat	CO: 4200–4900 ppm NO ₂ : 660–710 ppb
2	Sore Hari di Kawasan Kopo Elok	Minggu, 15 September 2024, pukul 12.47 WIB Jl. Galaxy Selatan, Kopo Elok	Cuaca panas, lalu lintas dan aktivitas industri padat	CO: 4600–4900 ppm NO ₂ : 680–720 ppb

3.1 Pengujian 1

Pengujian 1 dilakukan di Bandung, tepatnya di samping Miko Mall, pada hari Minggu, 15 September 2024 pukul 06.50 WIB secara real-time. Lokasi ini dipilih karena merupakan kawasan padat penduduk dan pusat aktivitas dengan lalu lintas kendaraan yang cukup ramai. Namun, saat pengujian berlangsung kondisi cuaca cerah dan arus kendaraan relatif sepi.

Rangkuman hasil metode Fuzzy Mamdani pada pengujian 1 (tabel 9) menampilkan hubungan antara nilai input CO dan NO₂, kategori himpunan fuzzy masing-masing variabel, aturan fuzzy yang aktif, serta hasil prediksi keluaran berupa nilai ISPU.

Tabel 9. Rangkuman Hasil Fuzzy Pengujian 1

Waktu	Nilai CO	Kategori CO (Fuzzy)	Nilai NO ₂	Kategori NO ₂ (Fuzzy)	Aturan Fuzzy Aktif	Prediksi ISPU (Fuzzy)	Hasil ISPU (Grafik)
07:00–07:05	4300–5000	Sedang → Tinggi	660–710	Tinggi	R6 / R8 / R9	Tidak Sehat	116–120
07:06–07:10	4400–4700	Sedang	680–700	Tinggi	R6	Tidak Sehat	118–120
07:11–07:14	4500–4700	Sedang	660–700	Tinggi	R6	Tidak Sehat	117–120
Sekitar 07:15	4400–4600	Sedang	540–580	Rendah	R4	Baik	104–110
Setelah 07:16	4400–4600	Sedang	600–630	Sedang → Rendah	R4 / R5	Baik atau Sedang	110–114

3.2 Pengujian 2

Pengujian 2 dilaksanakan di Kopo Elok, Jl. Galaxy Selatan RT 06/RW 05, Kelurahan Ciranrang, Kecamatan Babakan Ciparay, Kota Bandung, pada Minggu, 15 September 2024 pukul 12.47 WIB secara real-time. Lokasi ini dipilih karena merupakan kawasan padat penduduk yang berada di sekitar area pabrik dan belakang Miko Mall, sehingga berpotensi memiliki tingkat pencemaran udara yang signifikan.

Rangkuman hasil metode Fuzzy Mamdani pada pengujian kedua disajikan pada tabel 10, yang menampilkan hubungan antara nilai input CO dan NO₂, kategori himpunan fuzzy masing-masing variabel, aturan fuzzy yang aktif, serta hasil prediksi keluaran berupa nilai ISPU.

Tabel 10. Rangkuman Hasil Fuzzy Pengujian 2

Waktu	Nilai CO (µg/m ³)	Kategori CO (Fuzzy)	Nilai NO ₂ (µg/m ³)	Kategori NO ₂ (Fuzzy)	Aturan Fuzzy Aktif	Prediksi ISPU (Fuzzy)	ISPU (Grafik)
17:05 – 17:10	4800 – 5000	Sedang – Tinggi	740 – 760	Tinggi	R6 / R8 / R9	Tidak Sehat	124 – 125

~17:11	5500 (lonjakan)	Tinggi	780 (lonjakan)	Tinggi	R9	Tidak Sehat (maksimal)	126.8
17:12 – 17:18	4800 – 5000	Sedang – Tinggi	740 – 750	Tinggi	R6 / R8 / R9	Tidak Sehat	124 – 125
~17:19	3600 (turun drastis)	Rendah	~740	Tinggi	R3 / R7	Sedang	~123.5
17:20	~4800	Sedang	750	Tinggi	R6	Tidak Sehat	124

4. SIMPULAN

Sistem menggunakan metode Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani yang dihubungkan secara langsung dengan standar klasifikasi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) versi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, menjadikannya lebih relevan untuk konteks Indonesia.

Sistem ini dilengkapi dengan kemampuan visualisasi data kualitas udara secara waktu nyata (real-time) melalui platform ThingSpeak, yang belum banyak diadopsi dalam penelitian serupa.

Penggunaan mikrokontroler ESP32 dengan sensor gas MQ-2 dan MQ-7 menghasilkan sistem yang sederhana, murah, dan dapat diimplementasikan secara portable di lingkungan padat penduduk.

Sistem diuji langsung pada dua lokasi berbeda di Kota Bandung dengan karakteristik waktu dan aktivitas masyarakat yang berbeda, memperlihatkan kemampuan sistem dalam menghadapi variabilitas lingkungan.

Selain klasifikasi teknis, sistem ini juga dirancang untuk memberikan informasi yang edukatif dan dapat digunakan sebagai peringatan dini terhadap kondisi udara yang memburuk, sehingga berpotensi mendukung mitigasi risiko polusi.

DAFTAR PUSTAKA

Arief, M. R., & Lestari, E. D. (2019). Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan dengan Pendekatan Fuzzy Logic. *Jurnal ELINVO*, 4, 151–158.

Astuti, A. W., & Riyanto, B. (2022). Implementasi Sistem Monitoring Udara Real-Time Berbasis Mikrokontroler dan Fuzzy Logic. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Komputer*.

Chen, J., Ma, Y., & Zhao, Y. (2023). Fuzzy-Based Decision Support System for Air Quality Classification Using IoT Sensor Data. *IEEE Internet of Things Journal*.

Dewi, T. R., & Fadilah, S. N. (2023). Integrasi NodeMCU dan Sensor Gas untuk Monitoring Polusi Udara Menggunakan Fuzzy Logic. *Jurnal Elektro Dan Telekomunikasi*.

Fahmi, R., & Saputra, D. (2022). Sistem Monitoring Kualitas Udara Real-Time Menggunakan ESP32 dan Sensor MQ135. *Jurnal Rekayasa Elektrika*.

Hasan, M. R., & Chowdhury, S. (2019). Design and Implementation of IoT-Based Air Pollution Monitoring System Using Fuzzy Logic. *Procedia Computer Science*, 120–127.

Hidayat, M., & Ardiansyah, Y. (2023). Perbandingan Fuzzy Mamdani dan Sugeno dalam Sistem Klasifikasi Kualitas Udara Berbasis IoT. *Jurnal Teknologi Informasi*

- Dan Elektronika*,.
- Kartika, A. T., & Handoko, A. (2021). Optimalisasi Data Sensor Kualitas Udara Menggunakan Fuzzy Logic pada Sistem IoT. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sistem*.
- Kehutanan, K. L. H. dan. (2020). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara*. Jakarta: KLHK. From <https://Peraturan.Bpk.Go.Id/Details/163466/Permen-Lhk-No-14-Tahun-2020>.
- Kumar, P., Singh, R., & Sharma, A. (2021). Design of Smart Air Pollution Monitoring System Using IoT and Fuzzy Logic. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*,.
- Kurniawan, A., Putra, R. A., & Pratama, G. (2021). Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT dan Logika Fuzzy untuk Lingkungan Perkotaan. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Komputer*,.
- Maulana, R., & Aditya, R. P. (2021). Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Menggunakan NodeMCU dan Logika Fuzzy. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer Dan Informatika*.
- Nugroho, Y. A., & Wahyudi, S. (2019). Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan Sensor Gas Berbasis Arduino dan Internet of Things (IoT). *Jurnal Teknologi Informasi Dan Komunikasi*, 7(1), 12–20.
- Wijaya, R., & Sari, D. P. (2020). Pemanfaatan Logika Fuzzy dalam Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis ESP8266No Title. *Jurnal Teknologi Terapan*, 5(1), 45–51.
- Xu, B., Yu, M., & Chen, H. (2021). IoT-Based Smart Air Quality Monitoring and Alert System with Fuzzy Decision Support. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,.
- Yulianto, M., & Susanti, D. (2024). Sistem Deteksi Kualitas Udara Portable Menggunakan NodeMCU dan Sensor Gas MQ. *Jurnal Teknologi Dan Inovasi*.
- Zhang, Y., Liu, L., & Wang, C. (2020). Real-Time Air Quality Monitoring System Based on IoT and Fuzzy Inference. *Sensors*.