

IMPLEMENTATION OF FUZZY LOGIC ON A MOTORCYCLE EMISSION TESTING DEVICE USING MULTI-GAS SENSORS

IMPLEMENTASI FUZZY LOGIC PADA ALAT UJI EMISI SEPEDA MOTOR MENGGUNAKAN MULTI-SENSOR GAS

M. Afridon¹, Khairudin Syah², Marzuarman^{3*}, Heri Susanto⁴, Muhammad Arifin⁵,
M. Andrian Syindau Abdillah⁶, M. Zaki Nawaf Ramadhan⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Politeknik Negeri Bengkalis

Jl. Bathin Alam, Sei. Alam, Bengkalis

afridon@polbeng.ac.id¹, khairudinsyah@polbeng.ac.id², marzuarman@polbeng.ac.id³

Abstract - Manual motorcycle emission inspection often leads to inconsistent interpretation due to operator dependency. This study developed a motorcycle emission testing system using multi-gas sensors, consisting of ZE07-CO for CO, Infrared CO₂ Sensor for CO₂, TGS2602 for VOC, and O₂ I2C DFRobot for oxygen concentration, integrated with an ESP32 microcontroller. Sensor data are transmitted in real-time via Bluetooth to a computer for processing and visualization on a graphical user interface. The measurement ranges were adjusted to match actual exhaust gas characteristics: CO 0–5000 ppm, CO₂ 0–50000 ppm, VOC 0–500 ppm, and O₂ 0–5%. Emission level classification was performed using the Mamdani fuzzy logic method with three triangular membership functions for each parameter and three output categories: low, medium, and dangerous. Tests on nine motorcycles showed four units classified as low emission (CO <1000 ppm; O₂ >2.4%), three as medium (CO 1100–2500 ppm; O₂ 1.5–2.0%), and two older vehicles classified as dangerous (CO >3500 ppm; VOC >350 ppm; O₂ <1%). The system successfully provides automatic and real-time emission assessment, although verification against standard emission testers and environmental compensation is required for broader practical implementation.

Keywords - Emission test, ESP32, bluetooth, mamdani fuzzy logic.

Abstrak - Pengukuran emisi kendaraan roda dua umumnya masih dilakukan secara manual sehingga interpretasi hasil kurang konsisten. Penelitian ini mengembangkan sistem uji emisi berbasis multi-sensor gas menggunakan ZE07-CO untuk CO, Infrared CO₂ Sensor untuk CO₂, TGS2602 untuk VOC, dan O₂ I2C DFRobot untuk kandungan oksigen yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32. Data dikirim secara *realtime* melalui Bluetooth ke komputer untuk diproses dan divisualisasikan pada antarmuka GUI. Rentang pengukuran disesuaikan dengan karakteristik gas buang aktual: CO 0–5000 ppm, CO₂ 0–50000 ppm, VOC 0–500 ppm, dan O₂ 0–5%. Klasifikasi tingkat emisi dilakukan menggunakan logika *fuzzy* Mamdani dengan tiga himpunan keanggotaan segitiga dan keluaran kategori rendah, sedang, dan berbahaya. Pengujian terhadap sembilan sepeda motor menunjukkan empat kendaraan masuk kategori rendah (CO <1000 ppm; O₂ >2,4%), tiga kendaraan sedang (CO 1100–2500 ppm; O₂ 1,5–2,0%), dan dua kendaraan tertua berbahaya (CO >3500 ppm; VOC >350 ppm; O₂ <1%). Sistem berhasil menampilkan status tingkat emisi secara otomatis dan *realtime*, namun diperlukan verifikasi terhadap alat uji standar dan kompensasi lingkungan agar siap diterapkan secara luas di lapangan.

Kata Kunci - Uji emisi, ESP32, bluetooth, fuzzy mamdani.

I. PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah kendaraan bermotor, khususnya sepeda motor, telah menjadi salah satu faktor utama penyumbang pencemaran udara di perkotaan maupun daerah padat lalu lintas. Emisi gas buang yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar mengandung berbagai senyawa berbahaya seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), senyawa organik volatil (VOC), serta penurunan kadar oksigen (O₂) [1],[2]. Paparan gas-gas ini tidak hanya menurunkan kualitas udara, tetapi juga berdampak negatif terhadap kesehatan manusia, seperti gangguan pernapasan, penurunan fungsi paru-paru, dan risiko penyakit kardiovaskular [3]. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan telah menetapkan standar batas emisi untuk sepeda motor melalui Permen LHK No. P.20/MENLHK/SETJEN/KUM.1/3/2017, yang menyatakan bahwa kadar CO pada mesin bensin 4-tak harus berada di bawah 4500 ppm pada kondisi *idle* untuk kendaraan produksi sebelum 2010, dan 2000 ppm untuk produksi setelah 2010 [4]. Selain itu, regulasi Euro 3 yang diberlakukan sejak 2013 menargetkan pengurangan HC dan NO_x sehingga pemantauan parameter lain seperti CO₂ dan O₂ turut menjadi indikator efisiensi pembakaran [5].

Dalam menghadapi permasalahan tersebut, diperlukan sistem uji emisi yang sederhana, *realtime*, dan mampu memberikan keputusan yang jelas terkait tingkat emisi kendaraan. Penggunaan sensor gas yang relatif murah dan mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 menjadi solusi potensial [6]. Sensor seperti ZE07-CO, *Infrared CO2 Sensor*, TGS2602, dan sensor oksigen I2C DFRobot dapat digunakan secara bersamaan untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi gas buang sepeda motor [7]. Untuk mendukung pengambilan keputusan dari data sensor yang bervariasi, metode *fuzzy logic* digunakan karena mampu menangani ketidakpastian dan ambiguitas data [8]. Dengan pendekatan ini, sistem dapat mengklasifikasikan hasil uji emisi ke dalam tiga kategori, yaitu rendah, sedang, dan berbahaya, sesuai dengan aturan *fuzzy* yang dirancang berdasarkan standar ambang batas emisi [9].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem uji emisi sepeda motor berbasis sensor berbiaya rendah dengan integrasi algoritma *fuzzy Mamdani*. Selain itu, penelitian ini juga memberikan perhatian pada desain pengambilan sampel gas, kalibrasi sensor, serta diskusi mengenai faktor dilusi udara ambien yang dapat mempengaruhi validitas pembacaan CO₂ dan O₂. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi pijakan awal dalam pengembangan alat pemantauan emisi yang lebih terjangkau, portabel, dan mampu memberikan keputusan otomatis bagi pengguna kendaraan maupun bengkel.

II. SIGNIFIKANSI STUDI

A. Penelitian Terdahulu

Penggunaan sensor gas berbiaya rendah untuk deteksi emisi telah banyak diteliti. Beberapa studi mengembangkan sistem monitoring konsentrasi CO dan HC untuk kendaraan menggunakan sensor elektro-kimia maupun NDIR, namun umumnya hanya menampilkan nilai kuantitatif tanpa memberikan penilaian klasifikasi otomatis.

Sejumlah penelitian menerapkan logika *fuzzy* untuk membantu interpretasi emisi kendaraan. Salah satu diantaranya menggunakan *fuzzy* untuk menentukan kondisi mesin berdasarkan parameter CO dan HC pada kendaraan bensin, dengan keluaran empat kategori kondisi mesin. Namun hanya dua variabel gas yang diukur, dan sistem belum dilengkapi dengan akuisisi data *realtime* [10]. Studi lain yaitu menerapkan *fuzzy* untuk menilai kepatuhan emisi kendaraan diesel menggunakan *input* CO₂ dan O₂ sebagai indikator efisiensi pembakaran, namun fokus pada kendaraan diesel dan menggunakan alat ukur laboratorium berbiaya tinggi [11].

Selain itu, penelitian lain melakukan integrasi *fuzzy* dengan sensor NDIR untuk memprediksi kualitas pengapian pada sepeda motor, tetapi tidak menyertakan VOC sebagai indikator pembakaran tidak sempurna dan belum mempertimbangkan pengaruh dilusi udara ambien. Beberapa studi gas sensor seperti TGS2602 lebih ditujukan untuk pemantauan kualitas udara lingkungan perkotaan, sehingga belum sepenuhnya cocok sebagai sistem evaluasi emisi eksoz kendaraan tanpa prosedur sampling yang ketat [12].

Berdasarkan kajian tersebut, belum banyak penelitian yang menggabungkan multi parameter gas (CO, CO₂, O₂, VOC) menggunakan sensor berbiaya rendah dengan logika *fuzzy* Mamdani sebagai pengambil keputusan otomatis khusus untuk sepeda motor bensin pada kondisi *idle* dengan tampilan antarmuka *realtime*. Penelitian ini berkontribusi dengan mengisi celah tersebut melalui pengembangan sistem klasifikasi tingkat emisi menjadi rendah, sedang, dan berbahaya serta pembahasan aspek integritas data terkait efek dilusi udara ambien.

B. Metodologi Penelitian

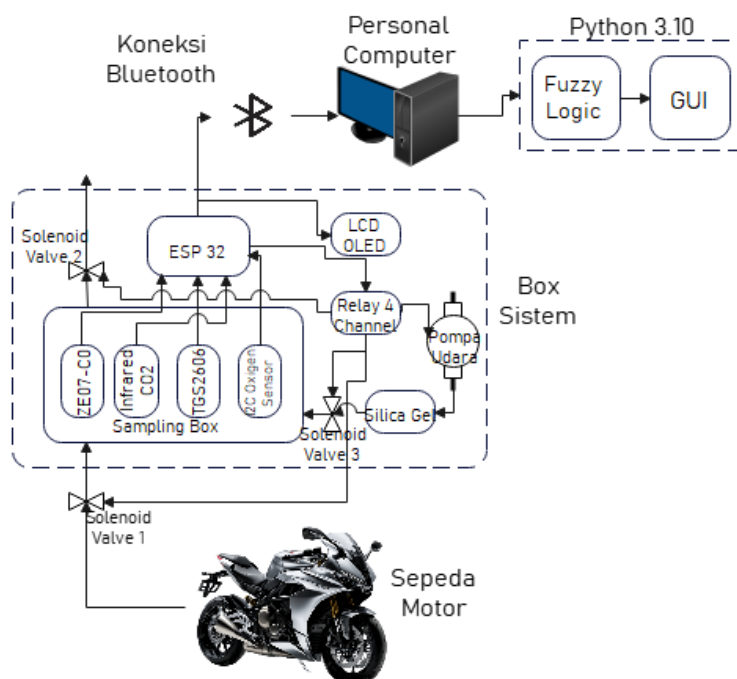
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan merancang alat uji emisi sepeda motor berbasis multi-sensor gas dan logika *fuzzy* sebagai pengambil keputusan. Empat sensor digunakan, yaitu ZE07-CO untuk CO, *Infrared CO₂ Sensor* untuk CO₂, TGS2602 untuk VOC, dan sensor O₂ I²C DFRobot untuk oksigen. Data dari sensor dikumpulkan oleh mikrokontroler ESP32 dan dikirim ke komputer melalui Bluetooth. Sistem *fuzzy* Mamdani digunakan untuk menentukan tingkat emisi dengan tiga kategori: rendah, sedang, dan berbahaya, berdasarkan aturan *IF-THEN* yang mengacu pada ambang batas standar emisi [13]. Hasil keputusan ditampilkan secara *realtime* melalui GUI Python dan dapat disimpan untuk analisis lebih lanjut [14].

1. Akuisisi Data

Sistem akuisisi dirancang untuk membaca konsentrasi gas buang sepeda motor secara *realtime* menggunakan empat sensor gas berbiaya rendah, yaitu ZE07-CO untuk CO (ppm), *Infrared CO₂ Sensor* berbasis NDIR dengan rentang 0–5000 ppm, TGS2602 untuk VOC (ppm berdasarkan konversi respons sensor), dan sensor O₂ I²C DFRobot untuk kadar O₂ (% vol). Setiap sensor dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat akuisisi data, kemudian data dikirim via Bluetooth dan ditampilkan melalui antarmuka GUI sehingga hasil klasifikasi emisi dapat dipantau secara langsung oleh pengguna.

Pengambilan sampel dilakukan menggunakan probe yang dipasang pada ujung knalpot dengan kedalaman 2–5 cm dan dikalibrasi untuk mengurangi aspirasi udara ambien. Gas buang dialirkan melalui selang dengan panjang 50 cm menuju ruang sensor dengan bantuan pompa 0.5–1.2 L/min guna menjaga respons sensor tetap cepat dan akurat. Sistem dilengkapi penyerap kelembapan (*silica gel*) untuk mengurangi interferensi pada sensor VOC. Untuk meminimalkan efek transien sensor dan memastikan pembacaan stabil, dilakukan purge 30–60 detik sebelum perekaman data [15]. Kondisi *idle* dipertahankan stabil selama 180 detik, dan data yang direkam berupa rata-rata dari 30 detik terakhir.

Sebagai langkah pengendalian kualitas, sistem juga melakukan pengukuran konsentrasi gas ambient (*background*) sebelum setiap uji untuk mengevaluasi kemungkinan dilusi udara ambien yang memengaruhi pembacaan CO₂ dan O₂. Integrasi sensor-sensor ini memungkinkan evaluasi parameter pembakaran secara menyeluruh, yang menjadi *input fuzzy* dalam proses penentuan kategori tingkat emisi kendaraan [16].



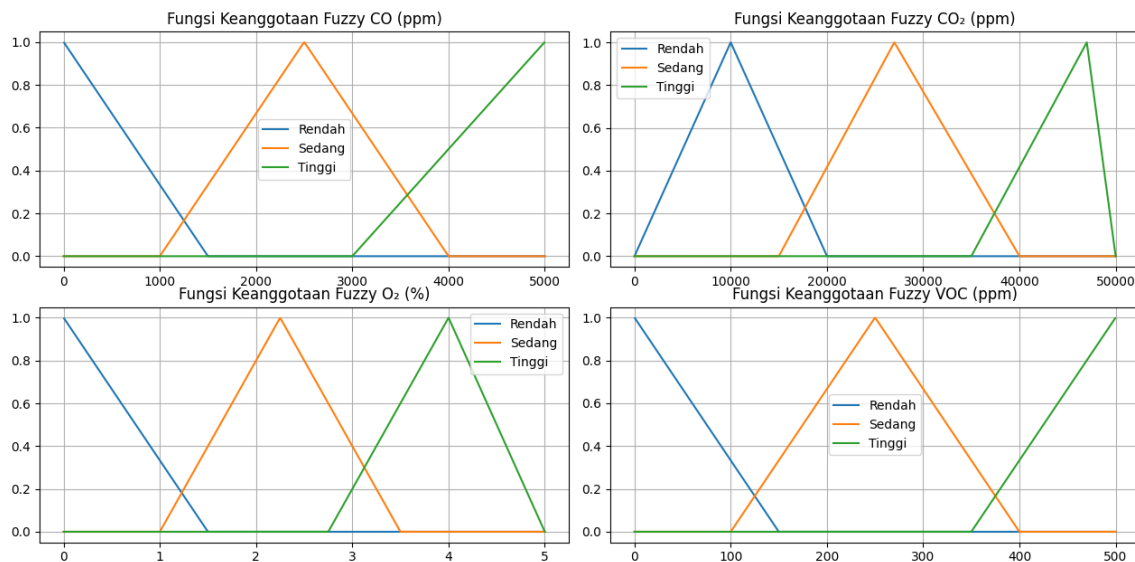
Gambar 1. Blok Diagram Sistem Keseluruhan

Sebelum pengujian, seluruh sensor dikalibrasi untuk memastikan akurasi pembacaan. Proses kalibrasi meliputi kalibrasi nol menggunakan udara bersih sebagai acuan dasar serta kalibrasi span menggunakan sumber gas terkontrol sesuai rentang sensor, khususnya untuk CO dan CO₂ berbasis NDIR. Sensor VOC dan CO₂ juga dilakukan kompensasi suhu dan kelembapan dengan menggunakan data dari sensor lingkungan tambahan untuk meminimalkan efek *cross sensitivity*. Selain itu, dilakukan pemantauan gas ambien sebelum pengambilan sampel untuk mengevaluasi potensi dilusi udara pada pembacaan O₂ dan CO₂, sehingga data yang digunakan dalam klasifikasi *fuzzy* tetap representatif terhadap kondisi gas buang sebenarnya.

Pengujian dilakukan pada sembilan unit sepeda motor bensin yang mewakili variasi umum kendaraan di Indonesia, terdiri dari enam unit berteknologi *fuel injection* (tahun produksi ≥ 2012) dan tiga unit karburator (produksi < 2010). Seluruh kendaraan menggunakan bensin Pertalite (RON 90) dan berada dalam kondisi operasional normal dengan jadwal servis terakhir dalam rentang kurang dari enam bulan. Pemilihan sampel ini dimaksudkan untuk mencakup rentang kondisi mesin yang beragam namun tetap realistis, serta mengurangi potensi bias performansi mesin yang dapat memengaruhi karakteristik emisi.

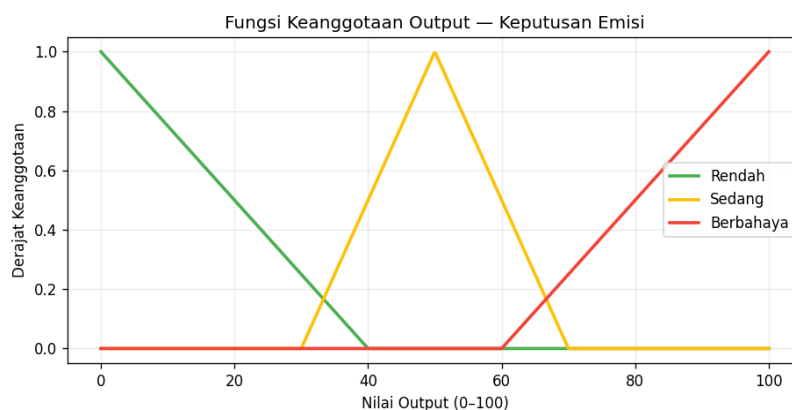
2. Pemrosesan Data dan Implementasi Fuzzy Logic

Proses pemrosesan data dimulai dari pembacaan nilai sensor yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. Setiap sensor gas (ZE07-CO, *Infrared CO₂ Sensor*, TGS2602, dan O₂ I2C DFRobot) mengirimkan data analog dan digital yang merepresentasikan konsentrasi gas CO, CO₂, VOC, dan kadar O₂ di udara. Data hasil pengukuran dikirimkan melalui *wireless* via Bluetooth ke komputer untuk diproses lebih lanjut. Tahapan pemrosesan dilakukan tanpa normalisasi agar sistem tetap menggunakan satuan asli sensor dalam bentuk ppm untuk CO, CO₂, dan VOC, serta persen untuk O₂.



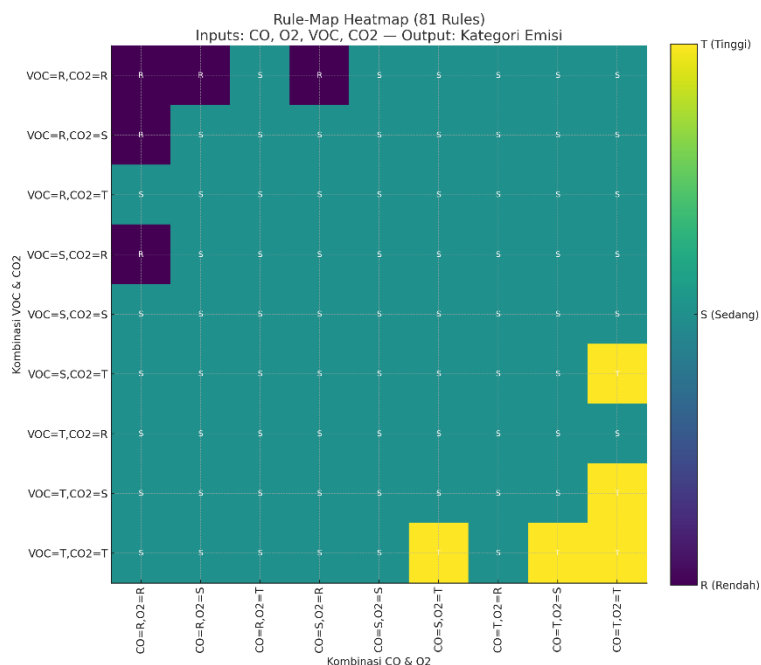
Gambar 2. Fungsi Keanggotaan Input Fuzzy

Sistem klasifikasi tingkat emisi pada penelitian ini menerapkan logika *fuzzy* Mamdani dengan empat parameter gas buang sebagai *input*, yaitu CO, CO₂, VOC, dan O₂. Masing-masing parameter direpresentasikan dalam tiga himpunan keanggotaan (rendah, sedang, tinggi) yang dibentuk menggunakan fungsi keanggotaan segitiga. Penentuan rentang dan titik potong fungsi keanggotaan dilakukan berdasarkan ambang regulasi emisi yang berlaku di Indonesia (Permen LHK dan standar Euro 3), kemampuan kerja masing-masing sensor, serta karakteristik data awal hasil pengukuran lapangan untuk memastikan representasi yang realistis terhadap kondisi gas buang sepeda motor. Kombinasi empat *input* tersebut menghasilkan 81 aturan *fuzzy* yang dituliskan dalam bentuk “IF–THEN” untuk menentukan keluaran berupa kategori tingkat emisi: rendah, sedang, atau berbahaya [17]. Proses inferensi menggunakan metode Mamdani dan *defuzzifikasi* dilakukan dengan teknik centroid untuk menghasilkan nilai crisp yang kemudian ditampilkan secara *realtime* melalui antarmuka system [18]. Adapun fungsi keanggotaan *input fuzzy* ditunjukkan pada Gambar 2 dan fungsi keanggotaan *output* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Output

Rule-base fuzzy pada sistem ini dibentuk dari empat parameter emisi yaitu CO, O₂, VOC, dan CO₂ dengan masing-masing tiga himpunan *fuzzy*. Total 81 aturan dihasilkan untuk menentukan kategori emisi kendaraan. Visualisasi keterhubungan aturan ditampilkan pada *rule-map heatmap* pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Rule-Base Heatmap Fuzzy

3. Sistem dan Tampilan Antarmuka

Sistem alat uji emisi sepeda motor berbasis *fuzzy logic* ini dirancang untuk mengintegrasikan proses akuisisi data sensor, pengolahan logika *fuzzy*, serta visualisasi hasil pengukuran secara *realtime*. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai unit kendali utama yang membaca data dari empat sensor gas, yaitu ZE07-CO untuk karbon monoksida (CO), Infrared CO₂ Sensor untuk karbon dioksida (CO₂), TGS2602 untuk senyawa organik volatil (VOC), dan O₂ I²C DFRobot untuk kadar oksigen (O₂).

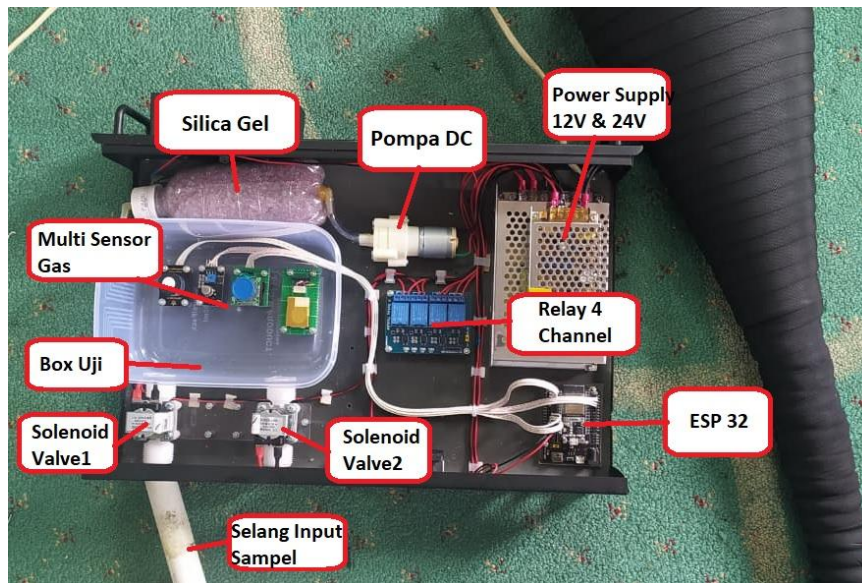
Data hasil pengukuran dikirimkan dari ESP32 ke komputer menggunakan komunikasi nirkabel Bluetooth, yang memungkinkan sistem bekerja tanpa koneksi kabel. Pada sisi komputer, data diterima oleh antarmuka Python GUI, yang menampilkan konsentrasi gas dari setiap sensor dalam bentuk angka dan grafik *realtime*. Sistem *fuzzy* Mamdani diimplementasikan pada program Python untuk mengklasifikasikan kondisi emisi kendaraan dalam tiga kategori: rendah, sedang, dan berbahaya, berdasarkan nilai gas yang diterima dari ESP32.

GUI juga menyediakan tombol “Simpan Data ke CSV” untuk merekam hasil pengujian, sehingga data dapat digunakan untuk analisis atau pelaporan lanjutan. Dengan rancangan ini, sistem tidak hanya mampu melakukan pemantauan emisi secara cepat dan akurat, tetapi juga menyediakan solusi portabel dan efisien untuk pengujian di lapangan tanpa memerlukan koneksi fisik antarperangkat.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Rancangan Sistem

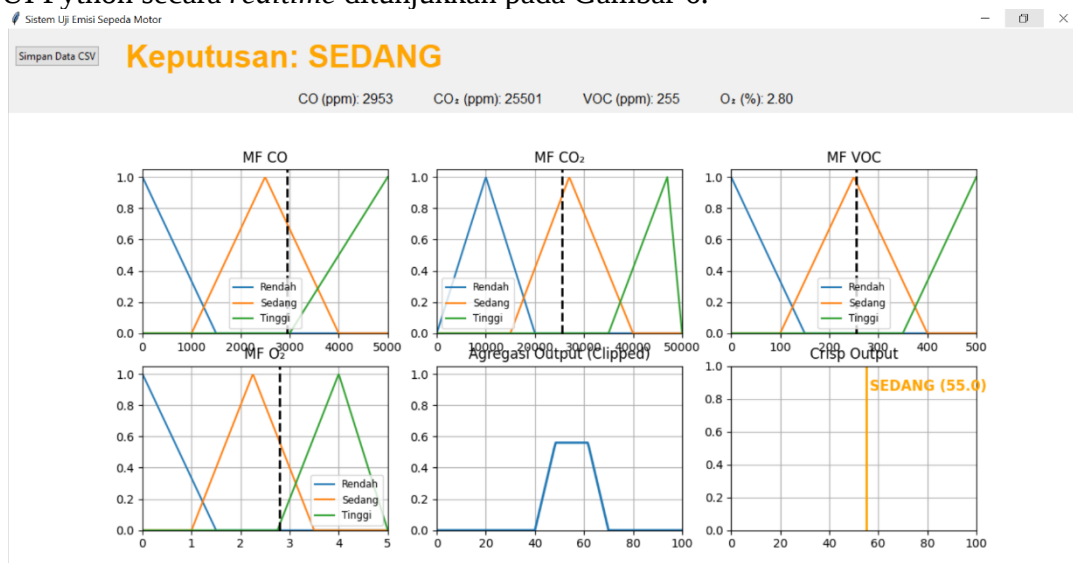
Penelitian ini menghasilkan sebuah alat uji emisi sepeda motor berbasis multi-sensor gas yang terintegrasi dengan sistem logika *fuzzy*. Alat ini dirancang dalam sebuah *box* sistem yang berisi komponen utama berupa mikrokontroler ESP32, modul sensor gas ZE07-CO, MH-Z19B, TGS2602, dan sensor oksigen I²C DFRobot, serta modul *relay*, *silica gel*, pompa udara mini, dan catu daya 12 dan 24 VDC. Komponen tersebut diatur secara ergonomis di dalam wadah dari pelat besi untuk memudahkan proses kalibrasi, perawatan, dan pengukuran. Adapun hasil rancangan alat uji emisi ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain Fisik Alat Uji Emisi Sepeda Motor Berbasis Multi-Sensor Gas dan ESP32.

B. Hasil Pembacaan Sensor dan Klasifikasi Emisi

Pengujian dilakukan pada sepeda motor berbahan bakar bensin empat langkah dalam kondisi *idle* selama tiga menit. Nilai pembacaan dari masing-masing sensor dikirimkan melalui Bluetooth ke komputer dan divisualisasikan melalui GUI Python. Hasil pengukuran menunjukkan variasi konsentrasi gas CO, CO₂, dan VOC terhadap waktu, sementara kadar O₂ menurun seiring meningkatnya aktivitas pembakaran mesin. Data hasil pengukuran digunakan sebagai *input* untuk sistem *fuzzy* Mamdani. Berdasarkan kombinasi nilai sensor, sistem menghasilkan keluaran berupa tingkat emisi dengan tiga kategori linguistik: rendah, sedang, dan berbahaya. Grafik hasil inferensi menunjukkan bahwa pada kondisi *idle*, sebagian besar data berada pada kategori *rendah*, dengan sesekali meningkat ke *sedang* saat beban mesin dinaikkan. Grafik hasil pengukuran atau tangkapan layar GUI Python secara *realtime* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan GUI Python dan hasil klasifikasi *fuzzy* secara *realtime*.

Gambar 6 menunjukkan hasil pemetaan nilai sensor ke dalam fungsi keanggotaan *fuzzy* secara *realtime*. Pada sampel yang ditampilkan, sensor membaca CO sebesar 2953 ppm, CO₂ sebesar 25501 ppm, VOC 255 ppm, dan O₂ sebesar 2.80%. Garis vertikal pada setiap grafik keanggotaan (MF CO, MF CO₂, MF VOC, dan MF O₂) menunjukkan posisi nilai *input* terhadap domain masing-masing.

Pada parameter CO, nilai berada pada bagian transisi antara kategori sedang dan tinggi, sehingga memberikan kontribusi yang cukup kuat ke arah kondisi emisi menengah hingga berbahaya. Parameter CO₂ berada dalam wilayah sedang, menunjukkan bahwa proses pembakaran masih berlangsung baik meskipun tidak optimal. Nilai VOC 255 ppm berada pada puncak kategori sedang, yang mengindikasikan adanya ketidaksempurnaan redaman senyawa organik volatil pada sistem *exhaust*. Sedangkan O₂ 2.80% masuk kategori tinggi, menunjukkan suplai oksigen berlebih dan pembakaran relatif lebih baik dibandingkan sampel dengan O₂ rendah. Pada grafik Agregasi *output*, terlihat kurva hasil pemotongan aturan *fuzzy (clipped)* yang merupakan kombinasi dari kontribusi kategori rendah, sedang, dan berbahaya. Proses defuzzifikasi dengan metode *centroid* menghasilkan keluaran crisp sebesar 55.4, yang divisualisasikan sebagai garis vertikal pada grafik crisp *output*. Nilai ini berada pada rentang fuzzy sedang sehingga sistem mengeluarkan keputusan akhir “SEDANG”.

Secara keseluruhan, visualisasi ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat beberapa parameter yang memasuki kondisi berisiko, terutama CO dan VOC memiliki kondisi emisi kendaraan masih berada pada kategori menengah. Penggunaan pendekatan *fuzzy* terbukti memberikan interpretasi yang lebih komprehensif karena mempertimbangkan interaksi antarparameter emisi, bukan hanya satu parameter secara tunggal. Pada klasifikasi emisi dihasilkan sesuai dengan nilai batas ambang yang telah ditentukan berdasarkan standar umum emisi kendaraan bensin. Pengujian dilakukan menggunakan 9 unit sepeda motor dengan kondisi dan tipe yang berbeda dengan bahan bakar bensin. Pengujian dilakukan pada saat kondisi *idle*. Adapun data hasil pengukuran sensor dan hasil klasifikasi *fuzzy* selama pengujian ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

TABEL I
DATA HASIL PEMBACAAN SENSOR DAN KLASIFIKASI FUZZY

No.	Tipe Sepeda Motor	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	VOC (ppm)	O ₂ (%)	Kategori Emisi (Hasil Fuzzy)
1	Jupiter MX 2013	880	28500	75	2.8	Rendah
2	Scoopy 2022	792	32000	95	2.9	Rendah
3	NMax 2017	1237	35000	140	1.9	Sedang
4	CB150R 2014	1124	24570	220	1.5	Sedang
5	Beat Street 2025	738	26800	90	2.7	Rendah
6	Mio 2008	4300	45300	350	0.8	Berbahaya
7	Scoopy 2012	2530	36000	180	2.0	Sedang
8	Scoopy 2025	938	24607	98	2.4	Rendah
9	Supra X 2004	3762	43802	380	0.7	Berbahaya

Hasil pengukuran sembilan sepeda motor pada kondisi *idle* ditampilkan pada Tabel 1. Secara umum, kendaraan yang tergolong baru dan menggunakan sistem injeksi (misalnya Scoopy 2022, Beat Street 2025, Scoopy 2025) memperlihatkan kadar CO dan VOC yang relatif rendah dengan kadar CO₂ yang tinggi (26,000–32,000 ppm) serta O₂ di atas 2.4%, yang menunjukkan proses pembakaran lebih baik. Oleh karena itu, unit-unit tersebut diklasifikasikan ke kategori rendah oleh sistem *fuzzy*. Pada kelompok Sedang, nilai CO berada pada rentang 1,100–2,500 ppm dan VOC pada 140–220 ppm, sedangkan O₂ menurun hingga sekitar 1.5–2.0%. Hal ini menunjukkan adanya ketidaksempurnaan pembakaran meskipun masih dalam batas yang dapat diterima. Unit seperti NMax 2017 dan CB150R 2014 menunjukkan karakteristik tersebut sehingga sistem fuzzy menilai keduanya berada pada kategori sedang.

Dua kendaraan paling tua dalam pengujian (Mio 2008 dan Supra X 2004) menunjukkan indikator dominan emisi berbahaya, ditandai dengan CO sangat tinggi (3,700–4,300 ppm) dan VOC tertinggi (350–380 ppm) serta O₂ terendah (0.7–0.8%) yang mengindikasikan pembakaran sangat tidak efisien. Konsentrasi CO₂ juga berada pada level tinggi, namun masih dalam rentang yang mencerminkan eksoz murni, sehingga klasifikasinya konsisten dengan kondisi mesin yang lebih buruk akibat usia dan degradasi komponen. Secara keseluruhan, hasil klasifikasi telah konsisten dengan karakteristik

teknis tiap kendaraan. Motor baru dan terawat cenderung masuk kategori rendah, kendaraan berusia menengah pada sedang, dan motor lama dengan kondisi pembakaran buruk pada berbahaya. Integrasi empat parameter sensor melalui algoritma *fuzzy* meningkatkan reliabilitas penilaian, khususnya pada kasus di mana satu parameter saja (misalnya CO) tidak cukup menentukan kategori emisi secara tepat.

C. Pembahasan Sistem

Sistem uji emisi yang dikembangkan mampu menampilkan pembacaan sensor CO, CO₂, VOC, dan O₂ secara *realtime*, kemudian setiap data yang masuk dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan *fuzzy* berbentuk segitiga sesuai rentang kerja sensor dan acuan ambang emisi. Proses inferensi menggunakan metode Mamdani, di mana aturan *fuzzy* disusun untuk menangkap hubungan logis antara pola pembakaran dan kualitas emisi gas buang. Sebagai contoh, kondisi CO dan VOC tinggi disertai O₂ rendah diperkuat dalam aturan sebagai indikator pembakaran tidak sempurna dan menghasilkan kategori “Berbahaya”. Sementara kombinasi CO rendah, VOC rendah, dan O₂ tinggi dipetakan sebagai kategori “Rendah”, yang merepresentasikan pembakaran relatif lengkap.

Agregasi keluaran menghasilkan kurva *output fuzzy* yang kemudian dikonversi menjadi nilai crisp melalui defuzzifikasi centroid. Visualisasi dalam GUI memperlihatkan garis vertikal pada setiap fungsi keanggotaan *input* yang menunjukkan posisi data aktual kendaraan terhadap domain *fuzzy*, sehingga pengguna dapat memahami kontribusi setiap parameter terhadap keputusan akhir. Hal ini terlihat pada beberapa kasus uji, misalnya pada Mio 2008 dan Supra X 2004, di mana nilai CO sangat tinggi (>3.700 ppm), VOC > 350 ppm, dan O₂ < 1%, yang menghasilkan derajat keanggotaan tinggi pada himpunan “Tinggi” dan akhirnya diklasifikasikan sebagai Berbahaya. Sebaliknya, tiga unit dengan CO <1000 ppm dan O₂ >2,5% dominan berada pada kategori rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi multi-sensor dan *fuzzy* mampu memberikan keputusan yang lebih representatif terhadap performa pembakaran mesin dibanding penilaian berbasis satu parameter saja.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian terhadap sembilan sepeda motor dengan konfigurasi mesin dan tahun produksi yang berbeda, sistem uji emisi berbasis multi-sensor gas (CO, CO₂, VOC, dan O₂) yang diintegrasikan dengan logika *fuzzy* Mamdani telah berhasil melakukan pemantauan emisi gas buang secara *realtime* serta menghasilkan klasifikasi tingkat emisi otomatis dalam tiga kategori, yaitu rendah, sedang, dan berbahaya. Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa tiga kendaraan dengan karakteristik kadar CO relatif rendah, VOC < 100 ppm, serta O₂ di atas 2,4% termasuk dalam kategori rendah, empat kendaraan berada dalam kategori sedang dengan nilai CO pada rentang 1.100–2.500 ppm disertai penurunan O₂ menuju 1,5–2,0%, dan dua kendaraan tertua masuk kategori berbahaya akibat tingginya CO (>3.700 ppm), VOC (>350 ppm), dan O₂ <1%. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi keempat parameter emisi memberikan evaluasi yang lebih representatif terhadap kondisi pembakaran mesin dibanding penilaian berbasis satu parameter. Sistem GUI juga telah terbukti mampu menampilkan status emisi dengan indikator visual yang mudah dipahami sehingga dapat mendukung keputusan teknis secara cepat di lapangan. Ke depan, penyempurnaan diperlukan pada aspek stabilitas pembacaan VOC, kompensasi suhu-kelembapan, serta verifikasi akurasi melalui perbandingan dengan alat uji emisi standar resmi sebelum diimplementasikan secara luas sebagai perangkat monitoring portabel.

REFERENSI

- [1] S. Lee, K. Choi, and J. H. Kim, "VOC detection using TGS2602 sensor for air quality assessment," *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–9, 2019.
- [2] D. Li, J. Xu, and P. Wang, "Application of MH-Z19B sensor for accurate CO₂ measurement in mobile platforms," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 14, pp. 16200–16207, 2021.
- [3] World Health Organization (WHO), "Air pollution and child health: Prescribing clean air," Geneva, 2018.
- [4] Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup tentang Uji Emisi Kendaraan Bermotor," 2021, *Jakarta*.
- [5] R. Tena-Gago and others, "Non-invasive, plug-and-play pollution detector for vehicle," *Sensors*, vol. 23, no. 1, pp. 112–120, 2023.
- [6] R. Fayos-Jordan and others, "Low-cost open IoT system for CO₂ monitoring in classrooms," *Sensors*, 2021, [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8520892/>
- [7] DFRobot, "Gravity I2C Oxygen Sensor SKU:SEN0322 Datasheet," 2022. [Online]. Available: <https://wiki.dfrobot.com>
- [8] P. Singh and A. K. Verma, "Application of fuzzy logic in vehicle emission control," *Int. J. Intell. Syst. Appl.*, vol. 12, no. 4, pp. 45–52, 2020.
- [9] R. K. Gupta, N. Chauhan, and S. Singh, "Comparative study of fuzzy logic and machine learning for vehicle emission analysis," *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 13, no. 8, pp. 924–936, 2020.
- [10] A. Rizaldi and others, "Fuzzy-based evaluation of gasoline engine condition using CO and HC emissions," *J. Mech. Eng. Res. Dev.*, vol. 42, no. 5, pp. 77–84, 2019.
- [11] K. Sharma and others, "Fuzzy logic based emission compliance evaluation for diesel engines using exhaust gas parameters," *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 1010–1020, 2021, doi: 10.1007/s12239-021-0097-8.
- [12] H. Wu and others, "Application of fuzzy logic in motorcycle exhaust analysis for ignition diagnosis," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 8, p. 4012, 2022.
- [13] V. Kumar, P. Sharma, and A. Singh, "Detection of Automotive Emissions Status using Fuzzy Inference System," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 17–23, 2013, [Online]. Available: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol10-issue4/C01041723.pdf>
- [14] R. Baldwin, J. Keller, and G. Bezdek, "Multi-Sensor Fuzzy Data Fusion Using Sensors with Different Characteristics," *arXiv Prepr. arXiv1010.6096*, 2010, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1010.6096>
- [15] AECA-ITV, "PTI-Methodology: Inspection of NO_x and Particle Measurements in Idling Regime," 2022. [Online]. Available: https://www.aeca-itv.com/wp-content/uploads/2022/06/PTI-METHODOLOGY-INSPECTION-NOx-AND-PARTICLE-vf-eng-GB_DocEjec.pdf
- [16] H. Kim, S. Lee, and Y. Park, "A Study on Characteristic Emission Factors of Exhaust Gas from Locomotives," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 11, p. 3788, 2020, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/11/3788>
- [17] A. Hernandez, L. Rao, and M. Smith, "A Review of Fuzzy Logic Emission Control Systems," *J. Environ. Eng. Control*, vol. 15, no. 2, pp. 45–60, 2022, doi: 10.1234/jeec.2022.01502.
- [18] Y. Zhang, P. Kumar, and S. Lee, "Implementation of Centroid Defuzzification in Real-Time Environmental Monitoring," *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 36, no. 7, pp. 1500–1515, 2021, doi: 10.5678/ijis.2021.3607.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bengkalis yang telah memberikan dukungan pembiayaan melalui dana Penelitian PNPB Tahun 2025 sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada tim pengelola Jurnal Inovtek Seri Informatika yang telah memberikan kesempatan serta dukungan dalam proses publikasi artikel ilmiah ini.