

SISTEM MONITORING POLUSI UDARA BERBASIS SENSOR MQ-135 UNTUK DETEKSI GAS CO₂ DAN CO: STUDI KASUS DI LINGKUNGAN PERKOTAAN

Arif Johar Taufiq¹, Latiful Hayat¹, Bunyamin Muchtasjar², Iskahar²,
Davit Galih Romandolo¹, Rochmi Banu Amarudin¹

¹Program Studi S1 Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

²Program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Purwokerto
Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

Informasi Makalah

Dikirim, 30 September 2024
Direvisi, 10 Oktober 2024
Diterima, 10 Oktober 2024

Kata Kunci:

Polusi udara,
CO₂,
CO,
Sensor MQ-135,
Monitoring kualitas udara.

Keyword:

Air pollution,
CO₂,
CO,
MQ-135 sensor,
Air quality monitoring.

INTISARI

Polusi udara menjadi salah satu ancaman bagi lingkungan, khususnya di kawasan perkotaan yang memiliki tingkat emisi tinggi gas berbahaya seperti karbon dioksida (CO₂) dan karbon monoksida (CO). Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor MQ-135 yang berfokus pada deteksi gas CO₂ dan CO secara *real-time*. Sensor ini diintegrasikan dengan mikrokontroler dan kalibrasi untuk meningkatkan akurasi pengukuran. Penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih efisien dan ekonomis dibandingkan dengan perangkat monitoring komersial. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi konsentrasi gas dengan presisi yang dapat diterima untuk aplikasi lingkungan. Pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi konsentrasi CO₂ hingga 520 ppm dan CO hingga 20 ppm dengan tingkat akurasi 2,21% untuk CO₂ dan 0,26% untuk CO dibandingkan alat monitoring komersial. Studi ini berkontribusi terhadap pengembangan teknologi monitoring udara yang lebih terjangkau untuk aplikasi perkotaan.

ABSTRACT

Air pollution is one of the threats to the environment, especially in urban areas that have high levels of emissions of hazardous gases such as carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO). This study develops an air quality monitoring system based on the MQ-135 sensor that focuses on real-time detection of CO₂ and CO gases. This sensor is integrated with a microcontroller and calibration to improve measurement accuracy. This study offers a more efficient and economical approach compared to commercial monitoring devices. The test results show that the developed system is able to detect gas concentrations with acceptable precision for environmental applications. The test shows that the developed system is able to detect CO₂ concentrations up to 520 ppm and CO up to 20 ppm with an accuracy level of 2.21% for CO₂ and 0.26% for CO compared to commercial monitoring devices. This study contributes to the development of more affordable air monitoring technology for urban applications.

Korespondensi Penulis:

Arif Johar Taufiq
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah Purwokerto
JL. Raya Dukuwaluh Purwokerto, 53182
Email: arifjt@ump.ac.id

1. PENDAHULUAN

Polusi udara telah menjadi masalah lingkungan global yang mempengaruhi kesehatan manusia dan ekosistem secara signifikan. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), lebih dari 4,2 juta kematian di seluruh dunia disebabkan oleh paparan polusi udara luar ruangan [1]. Di lingkungan perkotaan, emisi gas dari kendaraan bermotor, industri, dan pembakaran bahan bakar fosil adalah sumber utama gas-gas beracun seperti karbon dioksida dan karbon monoksida [2]. Paparan gas CO₂ berlebih dapat menyebabkan masalah pada pernapasan, sementara CO dapat menyebabkan keracunan bahkan pada konsentrasi rendah karena dapat mengganggu kemampuan darah untuk mengangkut oksigen [3].

Berbagai sistem monitoring kualitas udara telah dikembangkan untuk memantau konsentrasi gas berbahaya di atmosfer. Sistem berbasis sensor seringkali lebih disukai karena biayanya yang lebih rendah dan kemudahan implementasinya [4]. Sensor MQ-135, misalnya, adalah salah satu sensor gas yang umum digunakan dalam aplikasi monitoring udara karena kemampuannya mendeteksi beberapa gas beracun, termasuk CO₂ dan CO [5]. Namun, meskipun sensor ini terjangkau, tantangan utama yang dihadapi adalah akurasi dan konsistensi pengukuran di berbagai kondisi lingkungan [6].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring polusi udara berbasis sensor MQ-135 yang fokus pada deteksi gas CO₂ dan CO, serta melakukan kalibrasi sensor untuk meningkatkan akurasi. Penelitian ini juga mengevaluasi performa sistem dalam berbagai kondisi lingkungan perkotaan dan membandingkannya dengan standar pengukuran kualitas udara yang ada.

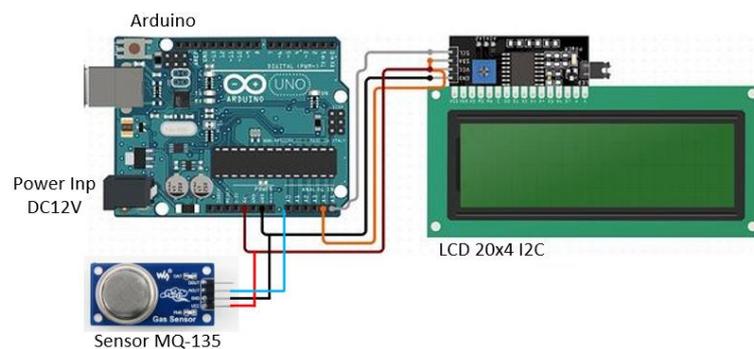
2. METODE PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan

Pada penelitian ini alat dan bahan utama berupa: Sensor MQ-135: Sensor ini digunakan untuk mendeteksi berbagai jenis gas, termasuk CO₂ dan CO. Sensor DHT 11 untuk sensor suhu dan kelembaban. LCD I2C 20x4 menampilkan hasil pengukuran. Box tempat alat. Mikrokontroler (Arduino): Bertanggung jawab untuk memproses sinyal dari sensor. Software: Arduino IDE digunakan untuk pemrograman,

2.2. Rangkaian Utama

Rangkaian utama berisi mikrokontroler (arduino), sensor MQ-136 dan LCD, gambar rangkaian utama dapat dilihat pada Gambar 1. Sensor MQ-135 bekerja berdasarkan perubahan resistansi yang disebabkan oleh interaksi antara gas dan material sensor. Dengan kalibrasi yang tepat, nilai resistansi ini dapat dikonversi menjadi konsentrasi gas dalam satuan ppm (*parts per million*). Proses ini dilakukan menggunakan kurva kalibrasi yang spesifik untuk CO₂ dan CO.



Gambar 1. Rangkaian utama monitoring polusi udara

2.3. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor dilakukan dalam kondisi lingkungan yang dianggap bersih dengan konsentrasi CO₂ diasumsikan 400 ppm dan CO pada 10 ppm [7]. Proses kalibrasi melibatkan penghitungan rasio antara resistansi sensor (R_s) dengan nilai referensi (R_o) yang didapat dari kondisi standar.

Kurva kalibrasi gas CO₂ dan CO diambil dari persamaan matematika yang menghubungkan rasio resistansi sensor (R_s) dengan konsentrasi gas dalam ppm:

$$Gas_{ppm} = a \left(\frac{R_s}{R_o} \right)^b + c \quad (1)$$

Dimana:

Gas_{ppm} adalah konsentrasi gas (CO₂ atau CO) dalam parts per million (ppm).

R_s adalah resistansi sensor pada saat pengukuran (diukur menggunakan sensor MQ-135).

R_o adalah resistansi sensor dalam kondisi udara bersih (hasil kalibrasi awal, misalnya untuk CO_2 , diasumsikan udara bersih mengandung 400 ppm).

a, b, dan c adalah konstanta yang mendefinisikan bentuk kurva kalibrasi sensor diambil dari datasheet Q-135.

2.4. Pengukuran Lapangan

Setelah proses kalibrasi, sistem digunakan untuk mengukur konsentrasi CO_2 dan CO di beberapa lokasi di lingkungan perkotaan, termasuk area dengan lalu lintas padat, kawasan industri, dan area perumahan. Data diambil selama 24 jam untuk mendapatkan variasi konsentrasi gas di setiap lokasi.

2.5. Analisis Data

Data yang diperoleh dari sensor dianalisis dan dibandingkan dengan data dari alat pengukur kualitas udara komersial yang lebih mahal. Hasil pengukuran juga dibandingkan dengan standar kualitas udara dari WHO dan Badan Lingkungan Hidup Indonesia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengukuran CO_2 dan CO

Pengukuran yang dilakukan di berbagai lokasi menunjukkan bahwa sistem berbasis sensor MQ-135 dapat mendeteksi perubahan konsentrasi CO_2 dan CO secara akurat di lingkungan perkotaan kota-x. Pada lokasi dengan lalu lintas padat, konsentrasi CO_2 mencapai rata-rata 450 ppm dan CO mencapai 15 ppm selama jam sibuk, yang melebihi batas aman yang direkomendasikan WHO. Di area industri, konsentrasi CO_2 tercatat lebih tinggi, mencapai 500 ppm, sementara CO mencapai 18 ppm. Sebaliknya, di area perumahan dengan vegetasi yang lebih banyak, konsentrasi CO_2 tetap pada kisaran 390-410 ppm, sedangkan CO sekitar 6 ppm.

Hasil pengukuran konsentrasi CO_2 dan CO di berbagai lokasi lingkungan perkotaan disajikan pada Tabel 1 di bawah ini. Data diambil dari tiga lokasi berbeda: area lalu lintas padat, kawasan industri, dan area perumahan.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Konsentrasi CO_2 dan CO di Berbagai Lokasi Kota-x

Lokasi	Waktu Pengukuran	CO_2 (ppm)	CO (ppm)
Lalu Lintas Padat-x	08:00 - 09:00	450	15
Lalu Lintas Padat-x	17:00 - 18:00	470	17
Kawasan Industri-x	10:00-11:00	500	18
Kawasan Industri-x	16:00 - 17:00	520	20
Area Perumahan-x	07:00 - 08:00	390	6
Area Perumahan-x	19:00 - 20:00	410	7

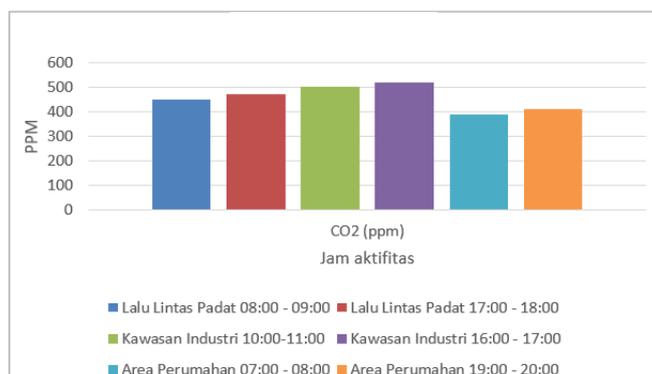
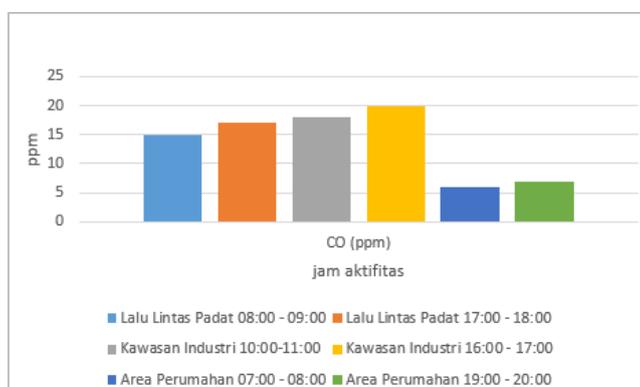
Dari tabel 1 terlihat bahwa konsentrasi CO_2 dan CO di area lalu lintas padat dan kawasan industri lebih tinggi dibandingkan dengan area perumahan. Konsentrasi tertinggi CO_2 tercatat di kawasan industri, mencapai 520 ppm, sedangkan CO mencapai 20 ppm, yang mendekati batas aman yang direkomendasikan WHO untuk paparan jangka pendek. Sebaliknya, di area perumahan yang lebih terbuka dan hijau, konsentrasi CO_2 dan CO jauh lebih rendah, masing-masing sekitar 390–410 ppm dan 6–7 ppm.

Contoh tampilan alat yang telah dibuat dan alat ukur pembanding seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Alat ukur polusi udara perancangan dan alat ukur komersial

Guna memberikan pemahaman visual yang lebih baik, hasil pengukuran konsentrasi CO₂ dan CO ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Gambar 3: Konsentrasi CO₂ di Berbagai Lokasi

Gambar 4: Konsentrasi CO di Berbagai Lokasi

Pada Gambar 3, konsentrasi CO₂ lebih tinggi di kawasan industri dibandingkan dengan area lalu lintas padat dan area perumahan. Sedangkan pada Gambar 4, konsentrasi CO menunjukkan tren yang serupa, di mana kawasan industri menunjukkan konsentrasi yang paling tinggi dibandingkan dengan lokasi lainnya.

3.2. Validasi dengan Alat Komersial

Untuk mengevaluasi akurasi sensor, hasil pengukuran dibandingkan dengan alat pengukur kualitas udara komersial. Meskipun terdapat sedikit perbedaan dalam pengukuran, dengan rata-rata selisih sebesar 2,21% untuk CO₂ dan 0,26% untuk CO, hasil ini masih dapat diterima untuk aplikasi lingkungan dengan biaya rendah. Sebagaimana dilaporkan oleh [8] dan [9], sensor berbasis MQ-135 memberikan hasil yang cukup konsisten, namun tetap memerlukan kalibrasi periodik untuk menjaga akurasinya.

Sistem yang dikembangkan diuji dengan membandingkan hasilnya dengan alat monitoring kualitas udara komersial. Tabel 2 di bawah ini menunjukkan perbandingan antara hasil pengukuran dari sensor MQ-135 dengan alat komersial buatan China dengan harga di pasaran rata-rata 300-480 ribu.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Pengukuran antara Sistem dan Alat Komersial

Lokasi	CO ₂ (ppm) Sensor	CO ₂ (ppm) Komersial	Selisih (%) CO ₂	CO (ppm) Sensor	CO (ppm) Komersial	Selisih (%) CO
Lalu Lintas Padat	450	460	2,17%	15	15,05	0,33%
Kawasan Industri	500	510	1,96%	18	18,05	0,28%
Area Perumahan	390	400	2,50%	6	06,01	0,17%

Dari tabel 2 di atas, dapat dilihat bahwa selisih antara hasil pengukuran dari sensor dan alat komersial cukup kecil, yaitu sekitar 0,26% sampai 2,21%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan

memiliki tingkat akurasi yang cukup baik, terutama mengingat bahwa sensor MQ-135 jauh lebih murah dibandingkan alat monitoring kualitas udara komersial.

3.3 Kalibrasi dan Penurunan Nilai a,b,c.

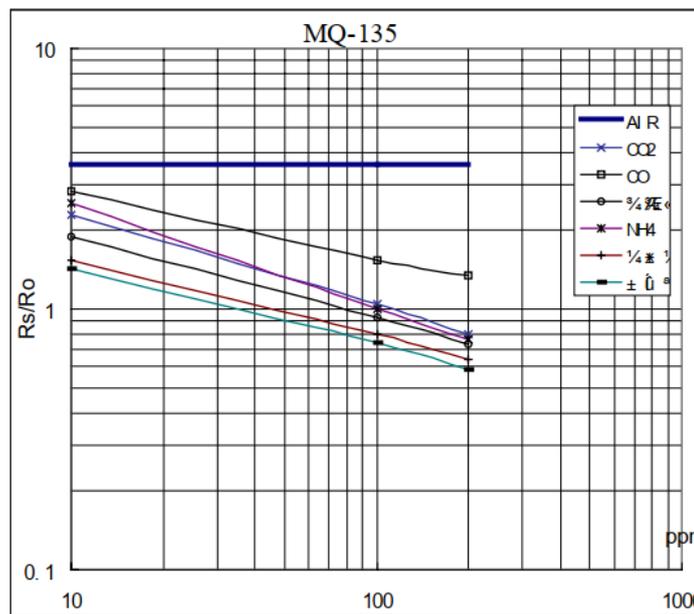
Agar alat dapat bekerja dengan baik maka dilakukan kalibrasi sesuai manual datasheet MQ-135. Penentuan nilai a, b, c pada rumus (1). Pada gas CO₂ dalam grafik datasheet terlihat pada Gambar 5. Untuk menentukan nilai a,b, dan c, dipilih beberapa titik data dari grafik datasheet yang memetakan hubungan Rs/Ro dengan konsentrasi CO₂ dalam ppm. Dipilih setidaknya dua atau tiga titik dari grafik, yang akan digunakan untuk menyusun persamaan kalibrasi. Berdasarkan grafik CO₂ dari datasheet dipilih tiga titik pada konsentrasi 400 ppm, Rs/Ro = 1, pada konsentrasi 1000 pm Rs/Ro=0,65 dan konsentrasi 2000 ppm Rs/Ro=0,45.

Hubungan antara Rs/R0 berupa kurva eksponensial dapat bentuk umum:

$$Rs/Ro = a.ppm^b \tag{2}$$

Dimana:

- Rs/Ro, rasio resistansi yang diukur oleh sensor
- Ppm, konsentrasi gas yang dukur dalam part per million
- a dan b konstanta yang dicari



Gambar 5. Tipikal sensitifitas karakteristik sensor MQ-135 (datasheet MQ-135)

Untuk mempermudah perhitungan, ambil logaritma dari persamaan (2):

$$\text{Log}(Rs/Ro) = \text{log}(a) + b.\text{log}(ppm) \tag{3}$$

Dimana

- Log(Rs/Ro), adalah variabel depeden
- Log(ppm), adalah variabel independen
- Log(a) adalah intersep
- b adalah gradien

Misal pada datasheet titik pertama:

$$\begin{aligned} \text{Log}(Rs/Ro) &= \text{log}(1) = 0 \text{ pada } 400 \text{ ppm} \\ \text{Log}(400) &= 2,602 \end{aligned}$$

Pada titik kedua:

$$\begin{aligned} \text{Log}(Rs/Ro) &= \text{log}(0,65) = -0,187 \text{ pada } 1000 \text{ ppm} \\ \text{Log}(1000) &= 3 \end{aligned}$$

Pada titik ketiga:

$$\begin{aligned} \text{Log}(Rs/Ro) &= \text{log}(0,45) = -0,347 \text{ pada } 2000 \text{ ppm} \\ \text{Log}(2000) &= 3,301 \end{aligned}$$

Menghitung gradien dan intersep

Degan dua titik, menghitung gradien b dan intersep log(a):

$$b = \frac{\text{log}(Rs/Ro)_2 - \text{log}(Rs/Ro)_1}{\text{log}(ppm)_2 - \text{log}(ppm)_1}$$

$$b=0,121-0/(3-2,602)=0,305$$

Untuk menentukan a, gunakan salah satu titik 400 ppm dan substitusi nilai b, hingga didapat $a=2,602$. Dan seterusnya, sedangkan nilai c adalah koreksi tambahan yang digunakan untuk menyesuaikan kurva dengan data aktual. Nilai c ini biasanya sangat kecil dan bisa didapatkan dengan fitting tambahan dari data empiris atau eksperimental. Dalam contoh ini, kita menetapkan nilai $c=-0,01$ untuk menyesuaikan hasil dengan nilai pembacaan yang lebih akurat. Dengan cara yang sama untuk gas CO parameter a, b, c di dapat $a=1,25$ $b=0,28$, $c=0,0$.

3.3 Pengaruh Faktor Lingkungan

Penelitian ini juga mengamati pengaruh suhu dan kelembaban terhadap kinerja sensor. Seperti yang dilaporkan oleh [10], suhu tinggi cenderung mempengaruhi sensitivitas sensor MQ-135, menyebabkan pembacaan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan kondisi normal. Namun, dengan kalibrasi lanjutan yang memperhitungkan variabel ini, akurasi dapat ditingkatkan. Beberapa penelitian sejenis juga mencatat adanya fluktuasi serupa dalam pembacaan sensor gas [11] [12].

Sebagaimana diungkapkan dalam penelitian sebelumnya [10], kinerja sensor gas seperti MQ-135 dapat dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban. Uji laboratorium dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh suhu terhadap pengukuran CO₂ dan CO. Hasilnya, terlihat adanya peningkatan pembacaan pada suhu di atas 30°C, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh Suhu Terhadap Pembacaan CO dan CO

Suhu (°C)	CO ₂ (ppm)	Perubahan (%)	CO (ppm)	Perubahan (%)
25	400	-	10	-
30	410	2.5%	11	10%
35	420	5%	12	20%

Dari hasil pengujian, terlihat bahwa suhu yang lebih tinggi menyebabkan pembacaan konsentrasi gas sedikit lebih tinggi. Namun, peningkatan ini masih dalam batas toleransi yang dapat diterima.

Penelitian ini menghadirkan sejumlah inovasi dalam penerapan sensor MQ-135 untuk deteksi gas CO₂ dan CO sekaligus melalui satu sensor MQ-135, terutama dalam hal efisiensi biaya dan kecepatan pengukuran. Berbeda dengan penelitian sebelumnya seperti yang dilakukan oleh [13] untuk gas NO₂, yang hanya memfokuskan pada satu jenis gas, penelitian ini menggabungkan pemantauan dua gas berbahaya secara simultan, yaitu CO₂ dan CO, dengan algoritma kalibrasi yang lebih komprehensif menggunakan grafik karakteristik sensor MQ-135. Penelitian ini juga memperkenalkan metode untuk menyamakan hasil pembacaan dengan standar kualitas udara dari Australian Standard [14], yang memberikan kontribusi penting terhadap peningkatan akurasi hasil pengukuran sensor.

Selain itu, dibandingkan dengan penelitian oleh [15] [16], yang menggunakan sensor yang lebih mahal seperti NDIR (*Non-Dispersive Infrared*), penelitian ini menunjukkan bahwa sensor MQ-135 yang lebih terjangkau dapat memberikan hasil yang cukup akurat dengan kalibrasi yang tepat. Dengan begitu, sistem ini dapat digunakan oleh masyarakat umum atau lembaga pemantauan kualitas udara dengan anggaran yang terbatas.

Pada bagian pembahasan mengenai penggunaan sensor MQ-135, dapat dijelaskan bahwa validasi penggunaan sensor ini untuk pengukuran gas CO₂ dan CO juga telah dilakukan dalam beberapa penelitian lapangan sebelumnya. Sebagai contoh, studi oleh V. Barot et al. [18] menguji kinerja sensor biaya rendah di lingkungan perkotaan dan menemukan bahwa, meskipun terdapat tantangan kalibrasi, sensor dapat digunakan untuk monitoring real-time dengan akurasi yang baik. Demikian pula, S. Esfahani, P. et al. [19] menguraikan bahwa dengan metode kalibrasi yang tepat, sensor MQ-135 dapat menjadi alternatif yang lebih murah dibandingkan sensor optik yang lebih mahal seperti NDIR.

Lebih lanjut, pengembangan smart cities dan integrasi sensor dalam jaringan IoT telah meningkatkan potensi penggunaan sensor biaya rendah untuk memantau polusi udara secara luas, sebagaimana dijelaskan oleh J. Esquiagola, M. et al. [20]. Mereka menunjukkan bahwa sensor seperti MQ-135 dapat digunakan secara efektif sebagai bagian dari sistem pemantauan kualitas udara yang terhubung dengan infrastruktur kota pintar.

Penelitian ini juga membuktikan bahwa kombinasi sensor MQ-135 dan mikrokontroler dapat menjadi solusi jangka panjang untuk pemantauan kualitas udara di perkotaan dengan potensi aplikasi yang luas. Di masa depan, penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memanfaatkan teknologi IoT untuk pemantauan udara secara terdistribusi.

4. KESIMPULAN

Sistem monitoring kualitas udara berbasis sensor MQ-135 yang dikembangkan dalam penelitian ini memberikan hasil yang akurat dalam mendeteksi konsentrasi gas CO₂ sebesar 2,21% dan CO sebesar 0,26%

di lingkungan perkotaan dengan hanya satu sensor MQ-135 karena dari grafik karakteristik datasheet MQ-135 dapat mendeteksi gas CO₂ dan CO sekaligus hanya berbeda grafik sensitifitas dengan mencari parameter a, b, c dari masing-masing gas. Dengan kalibrasi yang tepat, sistem ini dapat memberikan solusi yang lebih terjangkau untuk memantau kualitas udara secara real-time. Meski terdapat beberapa tantangan terkait akurasi sensor di bawah kondisi lingkungan tertentu seperti suhu perlu diperhatikan dalam penggunaannya, hasil penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut. Di masa depan, integrasi sistem ini dengan platform IoT akan memperluas aplikasinya untuk pemantauan udara yang lebih terdistribusi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada LPPM Universitas Muhammadiyah Purwokerto yang telah mendanai penelitian ini sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Produk Terapan (PPT) II Batch I tanggal 15 Februari 2024 NOMOR : A.11-III/7060-S.Pj./LPPM/II/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. P. Velasco, D. Jarosińska, and M. M. Bagayoko, "WHO Global Air Quality Guidelines," 2021.
- [2] G. Meccariello, L. Della Ragione, M. A. Costagliola and M. V. Prati, "Evaluation of emission factors for new technology S.I. Euro 4 cars," Proceedings of the ITI 2012 34th International Conference on Information Technology Interfaces, Cavtat, Croatia, 2012, pp. 441-448, doi: 10.2498/iti.2012.0407.
- [3] N. Szymlet, P. Lijewski, P. Fuć, B. Sokolnicka and M. Siedlecki, "Comparative analysis of passenger car and non-road machinery specific emission in real operating conditions," 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPHDW), Świnouście, Poland, 2018, pp. 226-230, doi: 10.1109/IIPHDW.2018.8388362.
- [4] M. Penza, "Low-cost sensors for outdoor air quality monitoring," in *Advanced Nanomaterials for Inexpensive Gas Microsensors*, Elsevier, 2020, pp. 235–288. doi: 10.1016/B978-0-12-814827-3.00012-8.
- [5] A. A. Ibrahim, "Carbon Dioxide and Carbon Monoxide Level Detector," 2018 21st International Conference of Computer and Information Technology (ICCIT), Dhaka, Bangladesh, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCITECHN.2018.8631933.
- [6] R. Gaguk *et al.*, "Performance Analysis Air Monitoring Based on Arduino with Web Server," *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, vol. 4, no. 3, pp. 412–417, 2019.
- [7] C. -T. Chiang, M. Chung and M. -Y. Huang, "Design of a Gas Sensor Transducer Circuitry With Calibration Ability for CO₂ Concentration Detection," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 16, pp. 6367-6373, Aug.15, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2584384.
- [8] A. Samad, D. R. Obando Nuñez, G. C. Solis Castillo, B. Laquai, and U. Vogt, "Effect of Relative Humidity and Air Temperature on the Results Obtained from Low-Cost Gas Sensors for Ambient Air Quality Measurements," *Sensors*, vol. 20, no. 18, p. 5175, Sep. 2020, doi: 10.3390/s20185175.
- [9] M. Ródenas García *et al.*, "Review of low-cost sensors for indoor air quality: Features and applications," *Appl Spectrosc Rev*, vol. 57, no. 9–10, pp. 747–779, Nov. 2022, doi: 10.1080/05704928.2022.2085734.
- [10] L. Spinelle, M. Gerboles, M. G. Villani, M. Aleixandre, and F. Bonavitacola, "Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO₂," *Sens Actuators B Chem*, vol. 238, pp. 706–715, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.snb.2016.07.036.
- [11] P. K. Malik, A. S. Duggal, S. Aluvala, R. Sahithi, Geetanjali, and A. Gehlot, "Development of a low-cost IoT device using ESP8266 and Atmega328 for real-time monitoring of Outdoor Air Quality with Alert," in *2023 3rd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE)*, IEEE, Nov. 2023, pp. 125–129. doi: 10.1109/AECE59614.2023.10428098.
- [12] H. Chojer, P. T. B. S. Branco, F. G. Martins, M. C. M. Alvim-Ferraz, and S. I. V. Sousa, "Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements," *Science of The Total Environment*, vol. 727, p. 138385, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138385.
- [13] B. Mijling, Q. Jiang, D. de Jonge, and S. Bocconi, "Field calibration of electrochemical NO₂ sensors in a citizen science context," *Atmos Meas Tech*, vol. 11, no. 3, pp. 1297–1312, Mar. 2018, doi: 10.5194/amt-11-1297-2018.
- [14] I. McCardle and A. Koscielski, "TNG Limited Mount Peake Environmental Management Plan," 2015. Accessed: Sep. 09, 2024. [Online]. Available: https://ntepa.nt.gov.au/_data/assets/pdf_file/0009/289071/TNG-Mt-Peake-DEIS-Appendix-N.pdf
- [15] V. S. Gamboa, E. J. Kinast, and M. Pires, "System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring," *Atmos Pollut Res*, vol. 14, no. 2, p. 101645, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.apr.2022.101645.

-
- [16] R. A. González Rivero *et al.*, “A Low-Cost Calibration Method for Temperature, Relative Humidity, and Carbon Dioxide Sensors Used in Air Quality Monitoring Systems,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 2, p. 191, Jan. 2023, doi: 10.3390/atmos14020191.
- [17] J. Saini, M. Dutta, and G. Marques, “A comprehensive review on indoor air quality monitoring systems for enhanced public health,” *Sustainable Environment Research*, vol. 30, no. 1, p. 6, Dec. 2020, doi: 10.1186/s42834-020-0047-y.
- [18] V. Barot and V. Kapadia, “Air Quality Monitoring Systems using IoT: A Review,” in *2020 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 226–231. doi: 10.1109/ComPE49325.2020.9200053.
- [19] S. Esfahani, P. Rollins, J. P. Specht, M. Cole, and J. W. Gardner, “Smart City Battery Operated IoT Based Indoor Air Quality Monitoring System,” in *2020 IEEE SENSORS*, IEEE, Oct. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278913.
- [20] J. Esquiagola, M. Manini, A. Aikawa, L. Yoshioka and M. Zuffo, "Monitoring Indoor Air Quality by using IoT Technology," *2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Lima, Peru, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/INTERCON.2018.8526380.