

Kalibrasi Sensor Gas CO dan CO₂ pada Sistem Deteksi Kebakaran Hutan dan Lahan Gambut Berbasis Mikrokontroler

Neny Kurniawati^{*1}, Karelius², Lilis Rosmainar², Rasidah², Yoricho Costapierro Sukoco¹, Kevin Bryan¹

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya

²Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya

*E-mail: nenykurniawati@mipa.upr.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.52188/jpfs.v8i1.1168>

Accepted: 11 Maret 2025

Approved: 16 Maret 2025

Published: 24 Maret 2025

ABSTRAK

Alat pendeteksi kebakaran memiliki peran penting dalam mencegah dan mengurangi dampak kebakaran hutan dan lahan gambut. Kalibrasi merupakan langkah penting untuk memastikan keakuratan dan keandalan alat tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengkalibrasi alat pendeteksi kebakaran dengan menganalisis kinerja sensor karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) yang digunakan dalam sistem pendeteksi kebakaran berbasis mikrokontroler. Hasil kalibrasi sensor MQ-7 untuk CO menghasilkan persamaan regresi polinomial orde dua $y = 0,228x^2 - 4,1967x + 18,302$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9901$, yang menunjukkan korelasi kuat antara tegangan keluaran sensor dan konsentrasi CO. Sementara itu, kalibrasi sensor MQ-135 untuk CO₂ menghasilkan persamaan $y = -0,3825x^2 + 34,345x - 231,37$ dengan nilai R^2 0,9623, yang menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa kalibrasi yang tepat dapat secara signifikan meningkatkan akurasi sistem deteksi kebakaran, mengurangi alarm palsu, dan meningkatkan efisiensi respons. Untuk meningkatkan akurasi lebih lanjut dalam aplikasi pemantauan real-time, metode koreksi tambahan seperti kompensasi suhu atau algoritma pembelajaran mesin perlu dipertimbangkan.

Kata kunci: sistem deteksi kebakaran, kalibrasi sensor, sensor karbon monoksida (CO), sensor karbon dioksida (CO₂), pemantauan berbasis mikrokontroler.

ABSTRACT

Fire detection devices play a crucial role in preventing and mitigating the impacts of forest and peatland fires. Calibration is an essential step to ensure the accuracy and reliability of these devices. This study aims to evaluate and calibrate fire detection instruments by analyzing the performance of carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO₂) sensors used in microcontroller-based fire detection systems. The calibration results for the MQ-7 CO sensor yielded a second-order polynomial regression equation $y = 0.228x^2 - 4.1967x + 18.302$ with a coefficient of determination $R^2 = 0.9901$, indicating a strong correlation between sensor output voltage and CO concentration. Similarly, the MQ-135 CO₂ sensor calibration produced the equation $y = -0.3825x^2 + 34.345x - 231.37$ with an R^2 value of 0.9623, demonstrating a high degree of accuracy. These results suggest that proper calibration significantly improves the accuracy of fire detection systems, reducing false alarms and enhancing response efficiency. To further enhance accuracy in real-time applications, additional correction methods such as temperature compensation or machine learning algorithms should be considered.

Keyword: Fire detection system, Sensor calibration, Carbon monoxide (CO) sensor, Carbon dioxide (CO₂) sensor, Microcontroller-based monitoring

PENDAHULUAN

Kebakaran hutan dan lahan telah menjadi perhatian masyarakat dan dianggap sebagai potensi ancaman terhadap pembangunan berkelanjutan karena dampaknya terhadap ekosistem, peningkatan emisi karbon, serta kerusakan keanekaragaman hayati. Kebakaran hutan menghasilkan emisi CO₂, CO, partikulat, dan hidrokarbon (Tampubolon & Boedisantoso, 2016). Lebih lanjut, kebakaran hutan dan lahan yang tidak dikendalikan merupakan masalah utama yang berkontribusi terhadap degradasi hutan dan lahan di daerah tropis.

Kalimantan Tengah merupakan wilayah di Indonesia yang rawan terhadap bencana kebakaran hutan dan lahan, terutama karena sebagian besar wilayahnya merupakan lahan gambut yang mudah terbakar pada musim kemarau. Provinsi Kalimantan Tengah memiliki sebaran lahan gambut yang luas, mencapai 2.743.158 ha. Berdasarkan data PKHL Kementerian Lingkungan Hidup RI, luas wilayah yang mengalami kebakaran hutan dan lahan di Kalimantan Tengah pada tahun 2019 adalah 134.227 ha (“Rekapitulasi Luas Kebakaran Hutan dan Lahan (Ha) Per Provinsi Di Indonesia Tahun 2015-2019 (Data s/d 30 September 2019),” 2019). Oleh karena itu, diperlukan sistem pendeteksi kebakaran hutan dan lahan yang efektif sebagai upaya pencegahan meluasnya kebakaran.

Sistem pendeteksi kebakaran sangat penting dalam pengelolaan bencana kebakaran hutan dan lahan. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan berbagai metode untuk mendeteksi dini kebakaran hutan, seperti penggunaan sistem sensor otomatis, pemantauan berbasis WebGIS, jaringan sensor nirkabel, serta pemanfaatan parameter cuaca untuk peringatan dini (Akbar & Rivai, 2016; Hariyawan, Gunawan, & Putra, 2013; Rosa, Simon, & Lieanto, 2020; Suwarsono, Rokhmatuloh, & Waryono, 2013; Utomo & Saputra, 2016). Namun, penelitian-penelitian tersebut belum secara spesifik diterapkan sebagai sistem pendeteksi kebakaran hutan dan lahan gambut di Kalimantan Tengah.

Dalam penelitian ini, dikembangkan alat pendeteksi kebakaran hutan dan lahan menggunakan sensor gas CO dan CO₂, yaitu sensor MQ-7 dan MQ-135 yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino. Sensor MQ-7 merupakan sensor gas yang dirancang untuk mendeteksi keberadaan karbon monoksida (CO) di udara. Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan resistansi yang terjadi akibat adanya gas CO, yang kemudian dikonversi menjadi tegangan listrik untuk diolah oleh sistem mikrokontroler (Tania, 2017; Wicaksono & Suismono, 2010). Sensor MQ-135, di sisi lain, digunakan untuk mendeteksi karbon dioksida (CO₂) serta gas berbahaya lainnya seperti amonia, benzena, dan uap alkohol (Abbas, Mohsin Saadoon, Abdalrdha, & Abud, 2020; Ubaidillah, 2021). Kombinasi kedua sensor ini memungkinkan sistem untuk mendeteksi potensi kebakaran lebih akurat dengan mengukur konsentrasi gas berbahaya yang dihasilkan dari pembakaran bahan organik di lahan gambut.

Mikrokontroler Arduino berfungsi sebagai pusat pemrosesan data dari sensor-sensor tersebut. Arduino memiliki keunggulan dalam fleksibilitas pemrograman dan kemampuannya untuk berkomunikasi dengan berbagai sensor serta modul tambahan seperti sistem komunikasi nirkabel. Dengan adanya mikrokontroler ini, sistem pendeteksi kebakaran dapat dikembangkan menjadi perangkat yang tidak hanya mampu mendeteksi keberadaan gas berbahaya, tetapi juga mengirimkan peringatan secara otomatis ke pusat pemantauan atau petugas yang berwenang (Sokop, Mamahit, & Sompie, 2016).

Kebakaran hutan dan lahan merupakan reaksi kimia eksotermis yang melibatkan oksigen dengan bahan bakar berupa vegetasi. Proses ini menghasilkan panas dan berbagai produk sampingan, termasuk karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂). CO terbentuk akibat pembakaran tidak sempurna akibat kekurangan oksigen, sedangkan CO₂ merupakan hasil pembakaran sempurna. Konsentrasi kedua gas ini dapat digunakan sebagai indikator adanya kebakaran di suatu area (Handayuni, Amran, & Razak, 2018; Hermawan, Hananto, & Lasut, 2016; Nugroho & S, 2017).

Sensor MQ-7 dan MQ-135 bekerja berdasarkan prinsip perubahan resistansi bahan semikonduktor yang dipengaruhi oleh keberadaan gas tertentu di sekitarnya. Ketika gas CO atau CO₂ masuk ke dalam sensor, material semikonduktor dalam sensor mengalami reaksi yang menyebabkan perubahan konduktivitas listrik. Perubahan ini kemudian dikonversi menjadi tegangan yang dapat diukur dan dianalisis oleh mikrokontroler (Fonollosa, Solórzano, Jiménez-Soto, Oller-Moreno, & Marco, 2016; Mahamudul Karim Khondaker, 2018; Tania, 2017; Wicaksono & Suismono, 2010).

Mikrokontroler seperti Arduino digunakan untuk membaca sinyal dari sensor, mengolah data, dan mengambil keputusan berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan. Arduino dapat diprogram untuk mengaktifkan alarm atau mengirimkan notifikasi saat konsentrasi CO dan CO₂ melewati batas yang aman.

Agar sistem ini dapat berfungsi dengan akurat dan memberikan hasil pengukuran yang andal, sensor gas CO dan CO₂ harus dikalibrasi dengan alat pembanding standar. Kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa nilai yang dihasilkan oleh sensor sesuai dengan konsentrasi gas yang sebenarnya di lingkungan. Dalam penelitian ini, kalibrasi sensor CO dilakukan menggunakan Carbon Monoxide Alarm Detector AZ Instrument 7701, sedangkan sensor CO₂ dikalibrasi menggunakan CO₂ Meter AZ Instrument 7752. Proses kalibrasi mencakup, pencocokan hasil pengukuran sensor dengan alat standar, serta penyesuaian faktor koreksi pada sistem mikrokontroler. Kalibrasi ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi sistem dalam mendeteksi kebakaran hutan dan lahan gambut berdasarkan kadar gas CO dan CO₂ di udara.

Diharapkan bahwa penelitian ini dapat menghasilkan perangkat pendeteksi kebakaran hutan dan lahan berbasis sensor gas yang efektif untuk diterapkan di wilayah lahan gambut Kalimantan Tengah. Dengan adanya sistem ini, langkah-langkah pencegahan dapat dilakukan lebih dini guna mengurangi dampak buruk kebakaran terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

METODE

Penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahapan yang dilaksanakan di Fakultas MIPA Universitas Palangka Raya, yaitu pembuatan alat pendeteksi kebakaran menggunakan sensor suhu, dan sensor gas CO dan CO₂ berbasis mikrokontroler, dan kalibrasi sensor pada lingkungan simulasi kebakaran hutan dan lahan.

Komponen yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

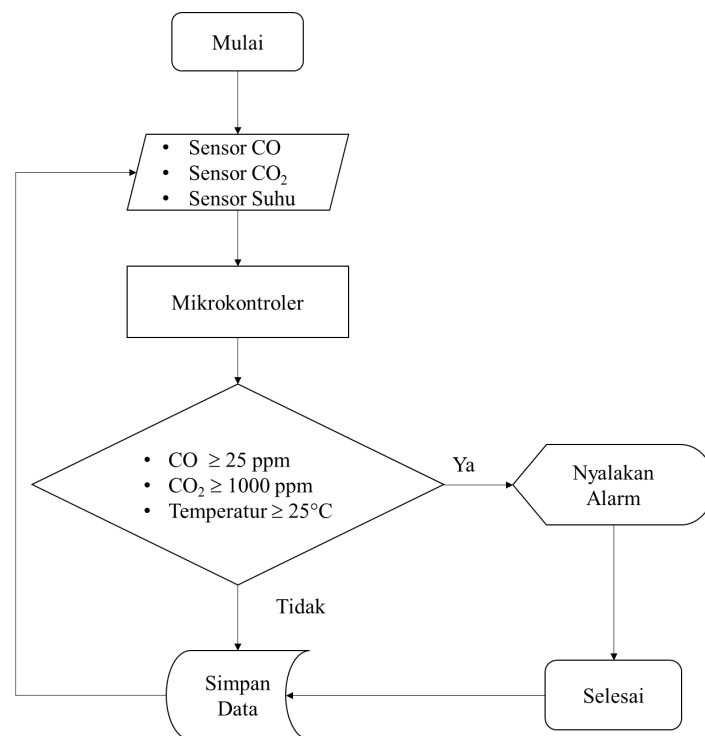
1. Modul Sensor gas CO dan CO₂
2. Modul sensor suhu
3. Catu daya 5 – 12 Volt
4. Mikrokontroler Arduino Mega
5. Alarm
6. Kabel penghubung

Alat pendeteksi kebakaran ini dirancang menggunakan sistem pemantauan kualitas udara berbasis mikrokontroler yang dilengkapi dengan sensor gas dan suhu. Sensor CO (karbon monoksida), CO₂ (karbon dioksida), dan suhu bekerja secara kontinu untuk mengukur kadar gas serta temperatur lingkungan. Data yang diperoleh dari sensor dikirim ke mikrokontroler untuk diproses dan dibandingkan dengan ambang batas yang telah ditentukan. Jika kadar CO mencapai atau melebihi 25 ppm, CO₂ mencapai atau melebihi 1000 ppm (Mustafa Hesham, 2019), atau suhu mencapai atau melebihi 25°C, sistem secara otomatis akan menyalakan alarm sebagai peringatan bahaya. Sebaliknya, jika semua parameter berada dalam batas aman, data hasil pengukuran akan disimpan untuk pemantauan lebih lanjut. Proses ini berlangsung secara otomatis dan berulang, sehingga memungkinkan pemantauan kualitas udara secara real-time serta memberikan peringatan dini terhadap potensi bahaya kebakaran. Diagram alir sistem alat pendeteksi kebakaran ditunjukkan pada Gambar 1.

Metode kalibrasi sensor gas CO dan CO₂ dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran alat pendeksi kebakaran dengan alat standar yang memiliki akurasi tinggi. Penulis menggunakan Carbon Monoxide Alarm Detector AZ Instrument 7701 untuk mengkalibrasi sensor CO dan CO₂ Meter AZ Instrument 7752 untuk sensor CO₂. Proses dimulai dengan menyiapkan lingkungan yang bebas dari gangguan eksternal seperti aliran udara berlebih atau sumber gas lain yang dapat memengaruhi hasil pengukuran. Setelah itu, tim menyalakan alat pendeteksi kebakaran yang dirancang dan alat pembanding, lalu membiarkannya beberapa menit hingga mencapai kondisi stabil.

Selanjutnya, tim melakukan pengukuran awal dengan menempatkan alat yang dirancang dan alat pembanding dalam satu lingkungan dengan kondisi udara normal. Mencatat hasil pengukuran awal untuk memastikan tidak ada deviasi yang signifikan antara kedua alat. Setelah itu, tim

mengekspos sensor dan alat pembanding terhadap gas CO dan CO₂ dengan asap yang berasal dari pembakaran kayu dan dedaunan, menempatkan kedua alat dalam lingkungan yang sama dan membiarkannya membaca nilai gas secara bersamaan. Hasil pembacaan alat yang dirancang dan pembacaan alat standar kemudian dianalisis menggunakan grafik polinomial, untuk melihat kesesuaian alat yang dirancang dengan alat ukur standar. Jika hasil pengukuran sensor berbeda dengan alat pembanding, tim melakukan penyesuaian melalui perangkat lunak pada sensor. Mengatur offset atau faktor koreksi agar hasil pengukuran sensor mendekati nilai yang ditunjukkan oleh alat standar.



Gambar 1. Diagram Alir Sitem Alat Pendeteksi Kebakaran

Kalibrasi dilakukan di Halaman Belakang Gedung FMIPA Universitas Palangka Raya dengan membuat simulasi kebakaran dengan membakar kayu dan dedaunan. Pengukuran dilakukan sebanyak 5 kali dengan interval waktu 30 detik selama 25 menit (Kosegeran, Kendekallo, Sompie, & Bahrn, 2013). Rata-rata hasil pengukuran gas CO dan CO₂ dianalisis menggunakan regresi polinomial (Huerta dkk., 2016) untuk menentukan hubungan antara keluaran alat yang dibuat dengan alat standar, kemudian diplot dalam grafik. Persamaan hubungan prototype dan alat standar diperlukan untuk menghitung konversi keluaran sensor (dalam satuan mV) ke pengukuran standar gas ppm. Berdasarkan library sensor MQ yang terdapat dalam program Arduino IDE diperlukan data regresi untuk mengkonversi satuan, menggunakan persamaan 1 untuk gas CO₂ dan persamaan 2 untuk gas CO, dimana A2 adalah koefisien pengali tegangan orde 2, A1 koefisien pengali tegangan orde 1, dan B adalah koefisien bebas.

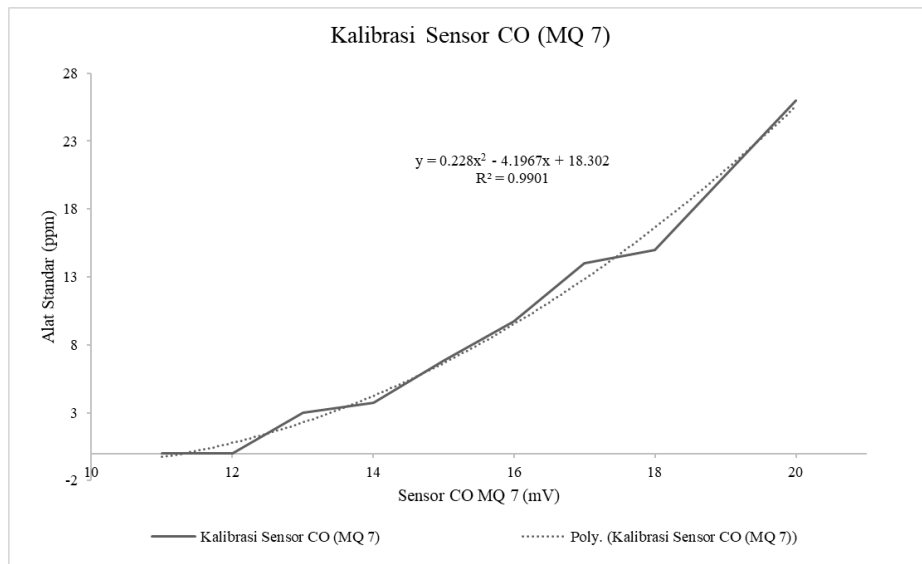
$$\begin{aligned}
 &MQ135.setRegressionMethod(1); \\
 &MQ135.setA2;MQ135.setA1;MQ135.setB \qquad \qquad \qquad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &MQ7.setRegressionMethod(1); \\
 &MQ7.setA2;MQ7.setA1;MQ7.setB; \qquad \qquad \qquad (2)
 \end{aligned}$$

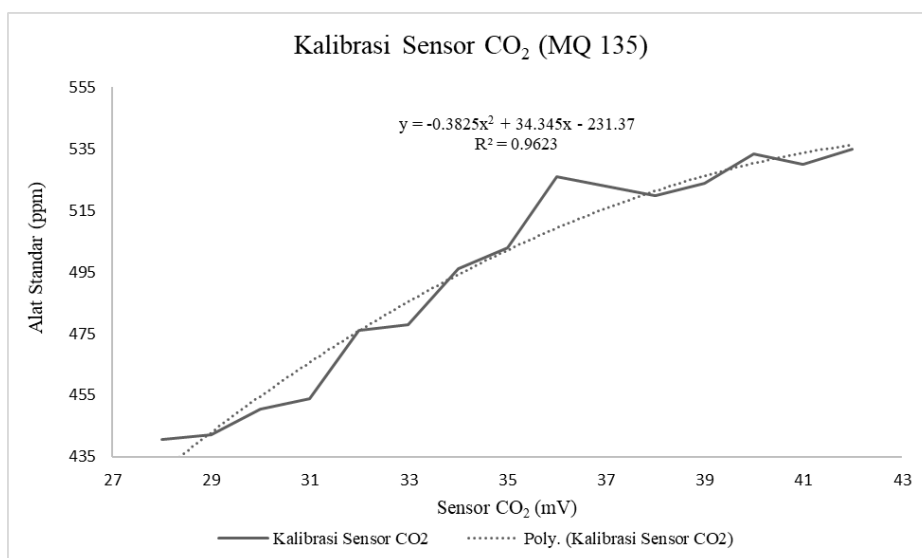
HASIL

Alat pendeteksi kebakaran dengan sensor gas CO-CO₂ dan sensor suhu berbasis mikrokontroler yang telah dibuat dikalibrasi dengan membandingkan hasil keluaran alat pendeteksi dengan alat standar. Kalibrasi alat pendeteksi hanya dilakukan untuk pendeteksi gas CO dan CO₂, sedangkan untuk sensor suhu tidak diperlukan kalibrasi karena sensor yang digunakan merupakan sensor digital yang telah dikalibrasi oleh pabrikan sensornya.

Kalibrasi untuk sensor gas CO (MQ 7) dilakukan membandingkan hasil pembacaan prototype dengan alat standar pengukur gas CO dengan merek Carbon Monoxide Alarm Detector AZ Instrument 7701, dan untuk sensor gas CO₂ menggunakan CO₂ Meter AZ Instrument 7752. Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan grafik polinomial antara hasil pembacaan alat yang dirancang dengan rata-rata pembacaan alat standar. Persamaan y menunjukkan hubungan antara pembacaan alat yang dirancang dengan alat standar yang kemudian dimasukkan pada persamaan (1) dan (2). Pada kalibrasi sensor CO didapatkan persamaan $y = 0,228x^2 - 4,1967x + 18,302$, dengan nilai $R^2 = 0,9901$, sedangkan pada sensor CO₂ didapatkan persamaan $y = -0,3825x^2 + 34,345x - 231,37$, dengan nilai $R^2 = 0,9623$.



Gambar 2. Grafik Kalibrasi Sensor CO



Gambar 3. Grafik Kalibrasi Sensor CO₂

PEMBAHASAN

Grafik kalibrasi sensor karbon monoksida (CO) MQ-7 (Gambar 2) menunjukkan hubungan antara tegangan keluaran sensor dan konsentrasi CO yang diukur menggunakan alat standar. Hasil regresi polinomial orde dua dengan persamaan $y = 0,228x^2 - 4,1967x + 18,302$ dan nilai determinasi $R^2 = 0,9901$ menunjukkan tingkat kecocokan yang sangat baik dengan data hasil pengukuran. Nilai R^2 yang mendekati 1 menegaskan bahwa persamaan regresi yang diperoleh mampu merepresentasikan hubungan antara output sensor dan konsentrasi gas CO secara akurat.

Sensor MQ-7 merupakan sensor gas berbasis *metal oxide semiconductor* (MOS) yang menggunakan SnO₂ (tin dioxide) sebagai material aktifnya. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada perubahan resistansi material semikonduktor ketika bereaksi dengan gas CO di lingkungan sekitarnya. Ketika gas CO terdeteksi, interaksi dengan material sensor menyebabkan perubahan tingkat konduktivitas, yang kemudian dikonversi menjadi tegangan keluaran oleh rangkaian sensor (Wang, Yin, Zhang, Xiang, & Gao, 2010). Sensor ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi pemantauan kualitas udara karena kepekaannya yang tinggi terhadap gas CO serta kemampuannya untuk memberikan respons cepat terhadap perubahan konsentrasi gas.

Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa sensor MQ-7 memiliki respons yang non-linear, sehingga diperlukan proses kalibrasi untuk meningkatkan akurasi pengukuran dalam berbagai kondisi lingkungan (Kobbekaduwa, Mel, & Oruthota, 2021). Faktor-faktor seperti kelembaban, suhu, dan kehadiran gas lain dapat mempengaruhi kinerja sensor, sehingga diperlukan pendekatan matematis untuk mengoreksi variasi yang terjadi. Salah satu metode yang umum digunakan adalah regresi polinomial, yang dapat menangkap pola non-linear dalam data dan menghasilkan model yang lebih akurat untuk estimasi konsentrasi gas CO. Hasil kalibrasi ini sejalan dengan studi yang menyatakan bahwa hubungan antara tegangan keluaran sensor dan konsentrasi gas umumnya bersifat non-linear dan dapat dimodelkan dengan fungsi polinomial (Huerta dkk., 2016). Dengan menggunakan persamaan regresi yang diperoleh, proses koreksi data dapat diterapkan untuk meningkatkan keakuratan pengukuran sensor MQ-7. Model ini dapat diterapkan dalam berbagai sistem pemantauan kualitas udara secara real-time, termasuk dalam sistem peringatan dini kebocoran gas, pemantauan emisi kendaraan, serta sistem deteksi gas beracun di lingkungan industri dan rumah tangga.

Sementara itu, grafik kalibrasi sensor karbon dioksida (CO₂) MQ-135 (Gambar 3) menunjukkan hubungan antara tegangan keluaran sensor (dalam milivolt) dan konsentrasi CO₂ yang diukur menggunakan alat standar (dalam ppm). Dari grafik ini, terlihat bahwa data hasil pengukuran sensor memiliki tren yang meningkat seiring dengan peningkatan nilai keluaran sensor. Model regresi polinomial orde dua yang diperoleh memiliki persamaan $y = -0,3825x^2 + 34,345x - 231,37$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,9623$, yang menunjukkan bahwa model ini memiliki tingkat kecocokan yang cukup baik terhadap data hasil pengukuran.

Sensor MQ-135 merupakan sensor berbasis MOS yang menggunakan lapisan SnO₂ sebagai material sensitif terhadap gas CO₂. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada perubahan resistansi material ketika gas CO₂ teradsorpsi di permukaan sensor, yang kemudian menyebabkan perubahan tegangan keluaran (Feng dkk., 2019; Li, Zhou, Peng, & Liao, 2020). Namun, karena respons sensor ini bersifat non-linear, diperlukan metode kalibrasi untuk meningkatkan akurasi dalam estimasi konsentrasi gas. Regresi polinomial adalah salah satu pendekatan yang sering digunakan untuk menangani hubungan non-linear antara tegangan keluaran sensor dan konsentrasi gas yang diukur (Huerta dkk., 2016).

Dari hasil kalibrasi ini, dapat dilihat bahwa meskipun model polinomial mampu menggambarkan hubungan antara output sensor dan konsentrasi CO₂ dengan cukup baik, terdapat beberapa penyimpangan pada data hasil pengukuran. Hal ini dapat disebabkan oleh faktor eksternal seperti suhu, kelembaban, dan keberadaan gas lain yang dapat mempengaruhi sensitivitas sensor MQ-135 (Li dkk., 2020). Oleh karena itu, dalam aplikasi pemantauan kualitas udara secara real-time, sensor ini sebaiknya dikombinasikan dengan metode koreksi tambahan seperti kompensasi suhu atau algoritma pembelajaran mesin untuk meningkatkan akurasi pengukuran (Yaqoob & Younis, 2021; Zimmerman dkk., 2018). Penggunaan metode koreksi ini dapat membantu mengurangi kesalahan

pengukuran akibat perubahan kondisi lingkungan dan meningkatkan keandalan sistem pemantauan kualitas udara di berbagai kondisi operasional.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa kalibrasi sensor gas CO dan CO₂ sangat penting dalam meningkatkan akurasi sistem deteksi kebakaran hutan dan lahan gambut berbasis mikrokontroler. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa regresi polinomial orde dua dapat secara efektif merepresentasikan hubungan antara tegangan keluaran sensor dan konsentrasi gas yang terdeteksi, dengan nilai R² sebesar 0,9901 untuk sensor MQ-7 (CO) dan 0,9623 untuk sensor MQ-135 (CO₂). Nilai R² yang tinggi menunjukkan bahwa model ini memiliki kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengukuran.

Meskipun demikian, terdapat beberapa faktor eksternal seperti suhu, kelembaban, dan keberadaan gas lain yang dapat mempengaruhi kinerja sensor. Oleh karena itu, dalam implementasi sistem pemantauan kualitas udara secara real-time, disarankan untuk menggunakan metode koreksi tambahan seperti kompensasi suhu atau algoritma pembelajaran mesin guna meningkatkan keakuratan pengukuran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemendikbudristek) Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui Program Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) serta mendukung pengembangan inovasi mahasiswa melalui Program Kreativitas Mahasiswa (PKM). Dukungan ini sangat berarti dalam pengembangan sistem deteksi kebakaran hutan dan lahan gambut berbasis sensor gas CO dan CO₂. Kami juga menyampaikan apresiasi kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- Abbas, F. N., Mohsin Saadon, Mis. I., Abdalrdha, Z. K., & Abud, E. N. (2020). Capable of Gas Sensor MQ-135 to Monitor the Air Quality with Arduino uno. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(10), 2955. <https://doi.org/10.37624/IJERT/13.10.2020.2955-2959>
- Akbar, L. A., & Rivai, M. (2016). Rancang Bangun Sensor Node pada Wireless Sensor Network Menggunakan Deret Sensor Gas dan Jaringan Syaraf Tiruan untuk Mendeteksi Kebakaran Hutan. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), A192–A197. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.16282>
- Feng, S., Farha, F., Li, Q., Wan, Y., Xu, Y., Zhang, T., & Ning, H. (2019). Review on Smart Gas Sensing Technology. *Sensors*, 19(17), 3760. <https://doi.org/10.3390/s19173760>
- Fonollosa, J., Solórzano, A., Jiménez-Soto, J. M., Oller-Moreno, S., & Marco, S. (2016). Gas Sensor Array for Reliable Fire Detection. *Procedia Engineering*, 168, 444–447. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.540>
- Handayuni, L., Amran, A., & Razak, A. (2018). Kajian Dampak Karhutla (Kebakaran Hutan dan Lahan) Provinsi Riau Terhadap Biaya Pelayanan Kesehatan pada Penyakit ISPA di Kota Payakumbuh Sumatera Barat. *Seminar Nasional dan Diskusi Panel Multidisiplin Hasil Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat 2018*, 1(1). Diambil dari <http://proceeding.unindra.ac.id/index.php/dispanas2018/article/view/3>
- Hariyawan, M. Y. H. M. Y., Gunawan, A. G. A., & Putra, E. H. P. E. H. (2013). Wireless Sensor Network for Forest Fire Detection. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 11(3), 563–574. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v11i3.1139>

- Hermawan, A., Hananto, M., & Lasut, D. (2016). Peningkatan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) dan Kejadian Gangguan Saluran Pernapasan di Kota Pekanbaru. *Jurnal Ekologi Kesehatan*, 15(2), 76-86–86. <https://doi.org/10.22435/jek.v15i2.4618.76-86>
- Huerta, R., Mosqueiro, T. S., Fonollosa, J., Rulkov, N. F., & Rodriguez-Lujan, I. (2016). Online Decorrelation of Humidity and Temperature in Chemical Sensors for Continuous Monitoring. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 157, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.07.004>
- Kobbekaduwa, N., Mel, W. R. de, & Oruthota, P. (2021). Calibration and Implementation of Heat Cycle Requirement of MQ-7 Semiconductor Sensor for Detection of Carbon Monoxide Concentrations. *Advances in Technology*, 377–392. <https://doi.org/10.31357/ait.v1i2.5068>
- Kosegeran, V. V., Kendekallo, E., Sompie, S. R. U. A., & Bahrin, B. (2013). Perancangan Alat Ukur Kadar Karbon Monoksida (CO), Karbon Dioksida (CO₂) dan Hidro Karbon (HC) Pada Gas Buang Kendaraan Bermotor. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 2(3), 50–56. <https://doi.org/10.35793/jtek.2.3.2013.2146>
- Li, B., Zhou, Q., Peng, S., & Liao, Y. (2020). Recent Advances of SnO₂-Based Sensors for Detecting Volatile Organic Compounds. *Frontiers in Chemistry*, 8, 321. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00321>
- Mahamudul Karim Khondaker. (2018, Maret 16). Arduino and MQ 135 Gas Sensor With Arduino Code. Diambil 8 Desember 2020, dari Arduino Project Hub website: <https://create.arduino.cc/projecthub/karimmufte/arduino-and-mq-135-gas-sensor-with-arduino-code-a8c1c6>
- Mustafa Hesham. (2019, April 5). Air Quality Monitor. Diambil 8 Desember 2020, dari Arduino Project Hub website: <https://create.arduino.cc/projecthub/mustafa-hesham/air-quality-monitor-b23523>
- Nugroho, H. A., & S, C. M. (2017). Prototipe Sistem Peringatan Dini Kebakaran Hutan Berbasis Parameter Cuaca. *Wahana Fisika*, 2(2), 129–139. <https://doi.org/10.17509/wafi.v2i2.9375>
- Rekapitulasi Luas Kebakaran Hutan dan Lahan (Ha) Per Provinsi Di Indonesia Tahun 2015-2019 (Data s/d 30 September 2019). (2019). Diambil 7 Desember 2019, dari SiPonggi—Karhutla Monitoring Sistem website: http://sipongi.menlhk.go.id/hotspot/luas_kebakaran
- Rosa, A. A., Simon, B. A., & Lieanto, K. S. (2020). Sistem Pendeteksi Pencemaran Udara Portabel Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135. *Ultima Computing: Jurnal Sistem Komputer*, 12(1), 23–28. <https://doi.org/10.31937/sk.v12i1.1611>
- Sokop, S. J., Mamahit, D. J., & Sompie, S. R. U. A. (2016). Trainer Periferal Antarmuka Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 5(3), 13–23. <https://doi.org/10.35793/jtek.5.3.2016.11999>
- Suwarsono, -, Rokhmatuloh, -, & Waryono, T. (2013). Pengembangan Model Identifikasi Daerah Bekas Kebakaran Hutan dan Lahan (Burned Area) Menggunakan Citra Modis di Kalimantan (Model Development of Burned Area Identification Using Modis Imagery in Kalimantan). *Jurnal Penginderaan Jauh Dan Pengolahan Data Citra Digital*, 10(2). Diambil dari http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal_inderaja/article/view/1904
- Tampubolon, A. P. C., & Boedisantoso, R. (2016). Analisis Persebaran Polutan Karbon Monoksida dan Partikulat dari Kebakaran Hutan di Sumatera Selatan. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), C160–C165. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.18955>
- Tania, M. (2017). *Alat Pendeteksi Gas CO Menggunakan Sensor MQ-7 Berbasis Arduino*. Diambil dari <http://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/3862>
- Ubaidillah, M. (2021). *Alat Ukur Kualitas Udara Menggunakan Sensor Gas MQ135 Berbasis Mikrokontroler Atmega16A*. Diambil dari https://www.academia.edu/11491199/Alat_Ukur_Kualitas_Udara_Menggunakan_Sensor_Gas_MQ135_Berbasis_Mikrokontroler_Atmega16A

- Neny Kurniawati*¹, Karelius², Lilis Rosmainar², Rasidah², Yoricho Costapierro Sukoco¹, Kevin Bryan¹ / JPFS 8 (1) (2025) 1-9
- Utomo, B. T. W., & Saputra, D. S. (2016). Simulasi Sistem Pendeteksi Polusi Ruangan Menggunakan Sensor Asap Dengan Pemberitahuan Melalui SMS (Short Message Service) Dan Alarm Berbasis Arduino. *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Asia*, 10(1), 56–68.
- Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R. (2010). Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors*, 10(3), 2088–2106. <https://doi.org/10.3390/s100302088>
- Wicaksono, Y., & Suismono, A. (2010). Deteksi Gas Berbahaya CO, CO₂, NOX dengan Penampil Dot Matrix dan Level Bahaya Serta Besarnya. *Non Degree Thesis, Ship Electricity Engineering, RSPP 629.89 Wic d, 2010*. Diambil dari <http://digilib.its.ac.id/ITS-NonDegree-3100010041196/14525>
- Yaqoob, U., & Younis, M. I. (2021). Chemical Gas Sensors: Recent Developments, Challenges, and the Potential of Machine Learning—A Review. *Sensors*, 21(8), 2877. <https://doi.org/10.3390/s21082877>
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., ... R. Subramanian. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), 291–313. <https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018>