

Desain dan Implementasi Detektor Suhu, Kelembaban, dan Karbon Monoksida (CO) Pasca Kebakaran Lahan Gambut di Sumatera Selatan

Arti Cahya Ardila⁽¹⁾, Hamdi Akhsan^{(1,a)*}, dan Iful Amri⁽¹⁾

⁽¹⁾Pendidikan Fisika, Universitas Sriwijaya, Indralaya, Indonesia, 30862

Email : ^(a*)hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id

Disubmisi: 28 November 2025, Direvisi: 12 Juni 2026, Diterima: 2 Juli 2026

Abstract.

Background: Peatland fires in South Sumatra, particularly in Ogan Ilir Regency, have a significant impact on air quality through the release of hazardous pollutants such as carbon monoxide (CO), as well as changes in microclimatic conditions including temperature and humidity.

Aims: This study aims to design and evaluate a portable detector based on an ESP32 microcontroller to monitor CO concentration, temperature, and humidity under post-fire conditions.

Methods: The system integrates an MQ-7 sensor with a measurement range of 0-1000 ppm for CO and a DHT11 sensor with temperature and humidity measurement ranges of 0-50 °C and 20-90% RH, respectively, complemented by an RTC DS3231 module and automatic data storage using a MicroSD card. Measurements were conducted over an eight-hour period in a post-fire peatland area in Ogan Ilir.

Results: The results indicate that CO was still detected within the range of 0.20-0.28 ppm, even though the fire had ended nearly one month earlier. Validation against a reference monitoring system yielded average errors of 0.13 °C for temperature, 0.19% for humidity, and 0.012 ppm for CO, accompanied by high correlation values. Microclimate analysis revealed a strong negative relationship between temperature and humidity ($r = -0.90$). Furthermore, validation against the reference system showed very high correlations for temperature ($r = 0.995$), humidity ($r = 0.999$), and CO ($r = 0.84$), confirming that the portable detector is capable of accurately capturing environmental fluctuation patterns.

Conclusion: These results demonstrate that the ESP32-based system is suitable as a low-cost environmental monitoring device for peatland fire-prone areas.

Keywords: peatland fire, carbon monoxide, temperature, humidity, ESP32.

Abstrak.

Latar Belakang: Kebakaran lahan gambut di Sumatera Selatan, khususnya di Kabupaten Ogan Ilir, berdampak signifikan terhadap kualitas udara melalui pelepasan polutan berbahaya seperti karbon monoksida (CO) serta perubahan kondisi iklim mikro berupa suhu dan kelembaban.

Tujuan: Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji detektor portabel berbasis mikrokontroler ESP32 untuk memantau konsentrasi CO, suhu, dan kelembaban pada kondisi pascakebakaran.

Metode: Sistem ini memadukan sensor MQ-7 dengan rentang pengukuran 4,36–4,68 ppm untuk CO dan sensor DHT11 dengan rentang pengukuran suhu 0–50 °C dan kelembaban 20–90% RH, dilengkapi modul RTC DS3231 dan penyimpanan data otomatis menggunakan MicroSD. Pengukuran dilakukan selama delapan jam pada area lahan gambut pascakebakaran di Ogan Ilir.

Hasil: Hasil menunjukkan bahwa CO masih terdeteksi dalam rentang 0,20–0,28 ppm meskipun kebakaran telah berakhir hampir satu bulan sebelumnya. Validasi terhadap sistem pemantauan referensi menghasilkan *error* rata-rata sebesar 0,13 °C untuk suhu, 0,19% untuk kelembaban, dan 0,012 ppm untuk CO, dengan nilai korelasi yang tinggi. Analisis iklim mikro memperlihatkan hubungan negatif kuat antara suhu dan kelembaban ($r = -0,90$). Validasi terhadap sistem pemantauan referensi menunjukkan korelasi sangat tinggi untuk suhu ($r = 0,995$), kelembaban ($r = 0,999$), dan CO ($r = 0,84$), menegaskan bahwa detektor portabel ini mampu menangkap pola fluktuasi lingkungan secara akurat.

Kesimpulan: Hasil ini menunjukkan bahwa sistem berbasis ESP32 layak digunakan sebagai perangkat *monitoring* lingkungan berbiaya rendah pada wilayah rawan kebakaran lahan gambut.

Kata kunci: kebakaran lahan gambut, karbon monoksida, suhu, kelembaban, ESP32.

PENDAHULUAN

Sumatera Selatan merupakan salah satu provinsi dengan lahan gambut terluas di Indonesia dan termasuk tiga wilayah dengan tingkat kebakaran terbesar [1]. Kabupaten Ogan Ilir menjadi salah satu daerah paling terdampak, dengan luas kebakaran mencapai 17.728 ha pada tahun 2014, 12.297 ha pada 2015, 2.614 ha pada 2017, dan kembali meningkat pada 2018-2019 [2]. Kebakaran Hutan dan Lahan (karhutla) gambut di wilayah ini berlangsung hampir setiap tahun sejak 2001 akibat kekeringan, anomali iklim, dan aktivitas manusia seperti pembukaan lahan [3,4]. Karakteristik smouldering pada lahan gambut dapat mencapai kedalaman 25-30 cm [5], dan penginderaan jauh menunjukkan akurasi deteksi area terbakar hingga 95% menggunakan Normalized Difference Moisture Index (NDMI) [6]. Tingkat kerawanan wilayah juga tinggi, dengan area bahaya besar mencapai ratusan kilometer persegi [7], dan sepanjang 2023 terdapat lebih dari 1.088 hektare area terbakar [8]. Kebakaran besar tahun 2020 juga tercatat menghasilkan lonjakan emisi secara regional hingga kontinental [9], menegaskan bahwa karhutla merupakan isu ekologis berskala luas.

Karhutla melepaskan berbagai polutan toksik, terutama karbon monoksida (CO), yang tidak berbau dan berpotensi menyebabkan gangguan pernapasan maupun keracunan [10,11]. CO merupakan salah satu emisi dominan pembakaran biomassa yang dipengaruhi oleh efisiensi pembakaran dan kondisi atmosfer [12], dan distribusinya secara regional dipengaruhi oleh densitas hotspot dan angin musiman [13]. Studi lain menunjukkan bahwa polutan kebakaran seperti PM_{2.5}, CO, dan ozon dapat

menurunkan kualitas udara, merusak jaringan paru, serta meningkatkan risiko kematian [14,15,16,17]. Polutan gas juga berinteraksi dengan kondisi atmosfer: kelembaban tinggi dapat menjebak polutan di permukaan [18], sementara kondisi inversi suhu menyebabkan akumulasi CO bertahan lebih lama [19].

Untuk menilai tingkat risiko kesehatan akibat paparan karbon monoksida (CO), diperlukan acuan standar ambang aman yang diakui secara internasional. Berdasarkan pedoman World Health Organization (WHO, 2006) yang dirujuk kembali dalam jurnal tentang kualitas udara dalam ruangan terbaru [20], batas aman paparan CO ditetapkan berdasarkan averaging time, yaitu 100 mg/m³ untuk paparan 15 menit, 35 mg/m³ untuk 1 jam, 10 mg/m³ untuk 8 jam, dan 7 mg/m³ untuk paparan 24 jam. Sementara itu, untuk konteks udara luar ruangan (udara ambien), United States Environmental Protection Agency (US EPA) melalui National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) menetapkan ambang konsentrasi CO sebesar 35 ppm untuk rata-rata 1 jam dan 9 ppm untuk rata-rata 8 jam guna melindungi kesehatan masyarakat [21].

Selain polutan gas, dinamika suhu dan kelembaban turut menentukan kondisi pascakebakaran. Suhu tinggi dan kelembaban rendah meningkatkan risiko kebakaran dan emisi CO [22]. Tren peningkatan suhu maksimum di beberapa wilayah juga berkaitan dengan frekuensi karhutla yang meningkat [23]. Fenomena iklim seperti Niño dan IOD positif turut memperpanjang periode kering [24]. Pada periode tertentu, suhu rendah akibat inversi atmosfer dapat memerangkap CO di lapisan permukaan sehingga konsentrasinya bertahan lebih lama [25]. Kondisi atmosfer

kering dapat memfasilitasi transportasi CO dalam jarak jauh hingga ribuan kilometer [24,25]. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan simultan parameter CO, suhu, dan kelembaban pada kondisi pascakebakaran.

Kemajuan teknologi memungkinkan pemanfaatan sensor berbiaya rendah (low-cost sensors) untuk monitoring lapangan. Sensor MQ-7 menunjukkan kinerja yang baik dalam mendeteksi CO setelah kalibrasi [28] dan memiliki error rata-rata rendah, yaitu 0.286% [29]. Namun, akurasi dipengaruhi suhu dan kelembaban sehingga perlu kompensasi [30]. Sensor DHT11 dapat mengukur suhu dan kelembaban pada rentang operasional dasar, sementara ESP32 menjadi mikrokontroler murah dan fleksibel untuk integrasi sistem monitoring [31][32]. Sistem berbasis IoT telah digunakan untuk monitoring CO [33], tetapi sistem berbasis jaringan kurang praktis untuk kondisi

lapangan pascakebakaran yang minim infrastruktur.

Berbagai studi sebelumnya membahas pola karhutla [3,4], karakteristik smouldering [5], deteksi area terbakar [6], distribusi CO [12,13], serta pengaruh suhu-kelembaban terhadap dinamika kebakaran [20,22]. Namun sebagian besar penelitian berfokus pada deteksi dini atau analisis skala luas, sementara pemantauan kondisi pascakebakaran secara langsung di lapangan masih jarang dilakukan [34].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menguji detektor portable berbasis mikrokontroler ESP32 untuk mengukur CO, suhu, dan kelembaban secara simultan pada kondisi pascakebakaran lahan gambut di Ogan Ilir, Sumatera Selatan, sebagai solusi monitoring berbiaya rendah untuk mendukung mitigasi karhutla di masa mendatang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode survei dengan pendekatan eksperimen kuantitatif untuk merancang, menguji, dan memvalidasi detektor potabel berbasis mikrokontroler ESP32 untuk memantau suhu, kelembaban, dan karbon monoksida (CO) pada kondisi pascakebakaran lahan gambut. Lokasi penelitian berada di Indralaya, Ogan Ilir, Sumatera Selatan, satu bulan setelah kejadian kebakaran lahan gambut yang tercatat oleh BPBD Ogan Ilir pada Oktober 2025. Pemilihan lokasi bertujuan untuk memperoleh data kualitas udara pada fase pemulihan ekosistem pascakebakaran.

Desain dan Rancangan Sistem Detektor

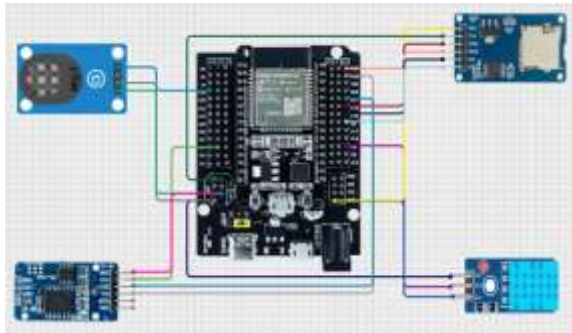
Perangkat deteksi dirancang menggunakan beberapa komponen utama :

1. ESP32 DevKit-V1

Sebagai pusat kendali dan pengolahan data.

2. Sensor MQ-7
Untuk mendeteksi konsentrasi CO.
3. Sensor DHT11
Untuk mengukur suhu dan kelembaban.
4. RTC DS3231
Untuk pemberian penanda waktu (timestamp).
5. Modul Micro SD Card
Untuk menyimpan data secara otomatis dalam format .csv.
6. Powerbank
Sebagai sumber daya portable.

Rancangan rangkaian (Gambar 1) di bawah ini menunjukkan koneksi sensor ke ESP32, di mana seluruh sinyal dibaca, diberi timestamp, lalu disimpan ke kartu memori.



Gambar 1. Desain Rancangan Detektor Suhu, Kelembaban, dan Karbon Monoksida

Prosedur Pembuatan dan Pengujian Alat

Tahapan pembuatan alat meliputi:

1. Perakitan seluruh komponen sesuai rancangan rangkaian.
2. Pemrograman ESP32 menggunakan Arduino IDE untuk:
 - Membaca keluaran MQ-7 dan DHT11,
 - Mengambil timestamp dari RTC DS3231,
 - Menyimpan data secara otomatis ke Micro SD Card.
 - Pengujian fungsi (debugging) pembacaan sensor integritas penyimpanan data
 - Kalibrasi awal untuk memastikan respons sensor terhadap variasi suhu, kelembaban, dan gas CO.
 - Pengujian stabilitas suplai daya untuk operasi lapangan.

Pengambilan Data Lapangan

Pengukuran dilakukan selama 8 jam, mulai pukul 08.04-15.59 WIB, dengan interval pencatatan setiap 5 menit. Parameter yang direkam:

- Konsentrasi CO (ppm)
- Temperatur udara (°C)
- Kelembaban udara (%)

Pengukuran dilakukan secara paralel dengan alat referensi kualitas udara berperforma tinggi untuk keperluan validasi.

Validasi dan Pengolahan Data

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran alat ESP32 dan alat referensi menggunakan:

1. Koefisien korelasi Pearson (r)
Untuk menilai kesamaan pola fluktuasi antar perangkat
2. Mean Absolute Error (MAE)
Untuk menentukan selisih rata-rata pembacaan.

Selain itu dihitung error per titik waktu:

$$e(t) = x(t) - y(t)$$

yang divisualisasikan dalam bentuk scatter plot untuk melihat sebaran deviasi.

Pengolahan data dilakukan secara deskriptif menggunakan:

- Grafik deret waktu (time series) untuk melihat dinamika setiap parameter,
- Heatmap korelasi untuk melihat hubungan antarparameter,
- Scatter plot CO-suhu dan CO-kelembaban,
- Grafik perbandingan ESP32 dan alat referensi,
- Scatter plot error $e(t)$

Seluruh prosedur disusun agar penelitian dapat direplikasi oleh peneliti lain dengan hasil yang sebanding.

HASIL DAN PEMBAHASAN

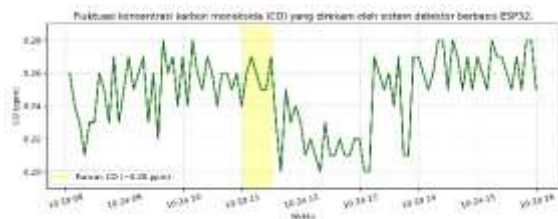
Kondisi Umum Parameter CO, Suhu, dan Kelembaban Pascakebakaran

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kawasan lahan gambut yang diamati masih mengalami perubahan kondisi atmosfer meskipun kebakaran telah berakhir sekitar satu bulan sebelumnya. Konsentrasi karbon monoksida (CO) yang terukur berada pada rentang 0.20-0.28 ppm, menunjukkan bahwa emisi residu masih terjadi akibat proses dekomposisi organik pada lapisan gambut yang masih hangat. Kondisi ini sesuai dengan temuan [25] dan [23], yang menyatakan bahwa tanah gambut

pascakebakaran tetap dapat melepaskan gas CO dari sisa pirolisis dan oksidasi lambat bahan organik.

Suhu dan kelembaban juga memperlihatkan pola mikroklimat khas wilayah tropis yang dipengaruhi radiasi matahari dan kelembaban tanah. Suhu meningkat dari 32 °C menjadi puncaknya 40.7 °C, sementara kelembaban turun dari 69% hingga 43.6%. Hubungan invers kuat ini sejalan dengan penelitian [30] bahwa suhu tinggi mempercepat penguapan dan sekaligus menurunkan kelembaban relatif di daerah pascakebakaran.

Pola Fluktuasi Konsentrasi Karbon Monoksida



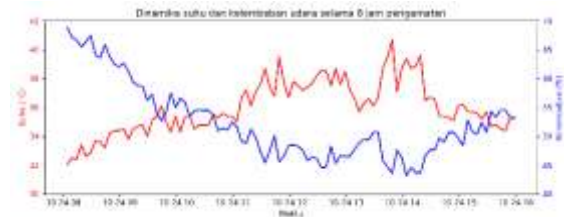
Gambar 2. Grafik Konsentrasi CO

Grafik di atas menunjukkan bahwa konsentrasi CO relatif stabil pada pagi hari, lalu meningkat tajam pada pukul 11.00-11.30 hingga mencapai 0.28 ppm. Lonjakan ini dapat diinterpretasikan sebagai:

1. Pelepasan gas akibat pemanasan tanah gambut, sehingga ketika suhu meningkat, lapisan tanah yang masih menyimpan sisa karbon volatil melepaskan CO dalam jumlah lebih besar.
2. Penurunan kelembaban tanah yang mempercepat proses oksidasi ringan di lapisan permukaan gambut.

Pola fluktuasi di atas sesuai dengan laporan [19], [7], dan [9] yang menemukan bahwa CO pascakebakaran cenderung menunjukkan puncak emisi saat pemanasan siang hari mencapai maksimum.

Dinamika Suhu dan Kelembaban



Gambar 3. Grafik Dinamika Suhu dan Kelembaban

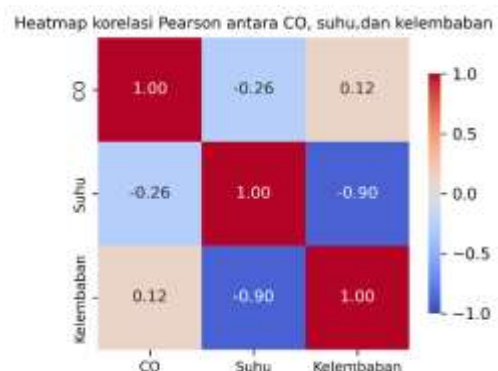
Grafik di atas memperlihatkan bahwa suhu dan kelembaban saling berlawanan (invers). Kenaikan suhu hingga 40.7 °C menyebabkan kelembaban turun signifikan. Korelasi negatif kuat antara kedua parameter ($r = -0.90$) menunjukkan kondisi termodinamika yang stabil, dan pola ini memperkuat penelitian [11] mengenai pengaruh pemanasan intensif terhadap penurunan kelembaban pada lahan gambut kering.

Perubahan mikroklimat ini sangat berpengaruh terhadap:

- Pergerakan gas CO (difusi meningkat pada suhu tinggi),
- Potensi pelepasan residu gas dari tanah yang memanas,
- Pola dispersi polutan di atmosfer permukaan.

Hubungan Antarparameter Lingkungan

1. Korelasi CO-Suhu-Kelembaban



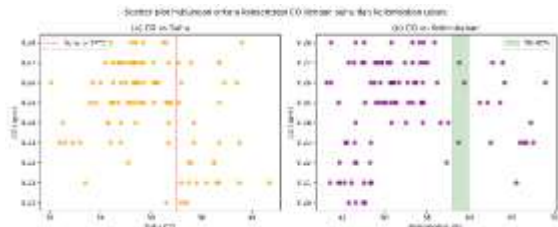
Gambar 4. Heatmap Korelasi antara CO, Suhu, dan Kelembaban

Analisis korelasi menunjukkan:

- CO vs Suhu : $r = -0.26$ (hubungan negatif lemah)
- CO vs Kelembaban : $r = 0.12$ (hubungan positif sangat lemah)

Nilai korelasi yang rendah mengindikasikan bahwa CO tidak sepenuhnya dikontrol oleh perubahan suhu atau kelembaban. Hal ini mendukung temuan [28] bahwa emisi CO pada tanah gambut pascakebakaran lebih dipengaruhi oleh proses biologis dan kimia internal tanah, bukan kondisi atmosfer permukaan.

2. Scatter Plot CO-Suhu dan CO-Kelembaban



Gambar 5. Scatter Plot CO-Suhu dan CO-Kelembaban

Scatter plot menunjukkan pola sebaran acak, namun :

- CO cenderung menurun Ketika suhu $>37^{\circ}\text{C}$, diduga akibat dispersi vertikal yang lebih cepat pada suhu tinggi (sejalan dengan temuan [26])
- CO sedikit meningkat pada rentang kelembaban 58-60%, kemungkinan karena kondisi ini mendukung pelepasan gas dari pori tanah sebelum difusi cepat terjadi.

Secara keseluruhan hubungan tersebut bersifat non-linier, menunjukkan kompleksitas interaksi iklim mikro tanah pada lahan gambut pascakebakaran.

Validasi Sistem Detektor ESP32

Hasil validasi antara sistem ESP32 dan alat referensi menunjukkan konsistensi sangat baik:

Tabel 1. Hasil Validasi Sensor ESP32 terhadap Alat Referensi

Parameter	Korelasi	MAE
CO (ppm)	0.84	0.012
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	0.995	0.13
Kelembaban (%)	0.999	0.19

Penghitungan error dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor pada sistem ESP32 terhadap alat standar sebagai referensi, yaitu alat ukur referensi terkalibrasi milik tim penelitian dosen, pada setiap titik pengukuran. Selisih antara pembacaan sensor dan alat referensi dihitung sebagai nilai absolut, kemudian diringkas dalam bentuk nilai Mean Absolute Error (MAE) yang ditampilkan pada tabel validasi. Selain itu, koefisien korelasi digunakan untuk menunjukkan tingkat kesesuaian pola antara pembacaan sensor dan alat referensi. Hasil validasi menunjukkan bahwa nilai korelasi yang sangat tinggi pada parameter suhu dan kelembaban, yang disertai nilai MAE masing-masing sebesar 0.13°C dan $0.19\% \text{RH}$, menandakan bahwa sensor DHT11 bekerja secara stabil dan konsisten. Sementara itu, korelasi yang kuat pada parameter CO ($r = 0.84$) dengan nilai MAE sebesar 0.012 ppm menunjukkan bahwa sensor MQ-7 mampu mendeteksi pola fluktuasi karbon monoksida secara andal meskipun berada pada konsentrasi rendah. Temuan ini sejalan dengan [8] yang melaporkan bahwa sistem berbasis ESP32 memberikan keandalan memadai sebagai perangkat monitoring lapangan berbiaya rendah.

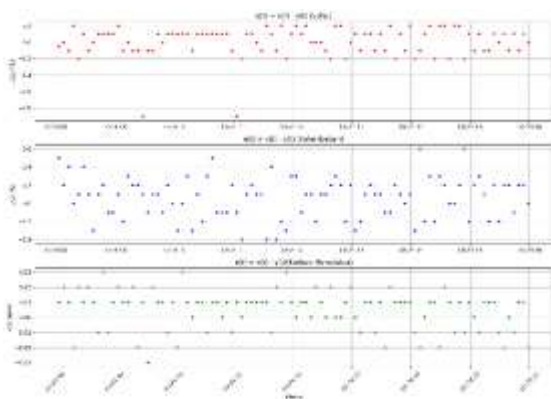
Keselarasan grafik di bawah ini antara sistem ESP32 dan sistem referensi menunjukkan bahwa perangkat sistem ESP32 layak digunakan untuk monitoring lingkungan real-time pada skala penelitian maupun edukasi yang berbiaya rendah.



Gambar 6. Perbandingan Pembacaan Sistem Detektor ESP32 dan Sistem Referensi

Scatter Plot Error Sistem Detektor ESP32

Gambar di atas menampilkan nilai konsistensi akurasi pembacaan sistem detektor berbasis ESP32 terhadap sistem referensi berperforma tinggi yang digunakan sebagai standar.



Gambar 7. Scatter Plot Error $e(t)$ pada Suhu, Kelembaban, dan Karbon Monoksida

Error pada ketiga parameter menunjukkan deviasi yang sangat kecil, yaitu $\pm 0,8$ °C untuk suhu, $\pm 0,6\%$ untuk kelembaban, dan $\pm 0,03$ ppm untuk CO, dengan rata-rata perbedaan mendekati nol. Hal ini menandakan tidak adanya bias sistematis dan menunjukkan bahwa sistem ESP32 mampu merekam data secara stabil dan akurat selama delapan jam pengamatan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang, mengimplementasikan, dan memvalidasi sistem detektor portabel berbasis ESP32 untuk memantau konsentrasi CO, suhu, dan kelembaban pada kondisi pascakebakaran lahan gambut di Ogan Ilir. Sistem ini memadukan sensor MQ-7 dengan rentang pengukuran CO sebesar 4,36-4,68 ppm serta sensor DHT11 dengan rentang pengukuran suhu 0-50 °C dan kelembaban 20-90% RH. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa CO masih terdeteksi meskipun kebakaran telah berakhir hampir satu bulan, sementara suhu dan kelembaban menunjukkan hubungan negatif kuat yang mencerminkan dinamika mikroklimat pascakebakaran.

Validasi terhadap alat referensi menghasilkan error rata-rata yang rendah, yaitu 0,13 °C untuk suhu, 0,19% untuk kelembaban, dan 0,012 ppm untuk CO, disertai nilai korelasi yang sangat tinggi pada seluruh parameter. Temuan ini menegaskan bahwa sistem berbasis MQ-7, DHT11, dan ESP32 mampu merekam pola fluktuasi lingkungan secara akurat dan stabil. Dengan performa tersebut, sistem ini layak digunakan sebagai perangkat monitoring lingkungan berbiaya rendah di wilayah rawan karhutla. Untuk pengembangan lebih lanjut, sistem dapat ditingkatkan dengan penambahan konektivitas IoT untuk pemantauan jarak jauh, kalibrasi lanjutan sensor CO, serta perluasan durasi dan lokasi pengukuran agar hasil pemantauan semakin komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Hein dkk., "The health impacts of Indonesian peatland fires," *Environ. Heal. A Glob. Access Sci. Source*, vol. 21, no. 1, hal. 1–16, 2022, doi: <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00872-w>.
- [2] D. Hernowo, M. Lestari, N.

- Novrikasari, W. Lionita, A. F. Rahmadini, dan T. Nurhaliza, "People's Behavior of North Indralaya of Ogan Ilir Against Wetland Fires," *J. Ilmu Lingkungan*, vol. 20, no. 2, hal. 316–324, 2022, doi: <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.316-324>.
- [3] M. Irfan dkk., "Dynamics of Peatland Fires in South Sumatra in 2019: Role of Groundwater Levels," *Land*, vol. 13, no. 3, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/land13030373>.
- [4] A. Amri dkk., "Dampak Bencana Kebakaran Hutan Terhadap Lingkungan dan Upaya Penanggulangan di Indonesia," *JRTI (Jurnal Ris. Tindakan Indones.)*, vol. 9, no. 2, hal. 159–166, 2024, doi: <https://doi.org/10.29210/30035130000>.
- [5] M. A. Santoso dkk., "GAMBUT Field Experiment of Peatland Wildfires in Sumatra: From Ignition to Spread and Suppression," *Int. J. Wildl. Fire*, vol. 31, no. 10, hal. 949–966, 2022, doi: <https://doi.org/10.1071/WF21135>.
- [6] A. Sirin dan M. Medvedeva, "Remote Sensing Mapping of Peat-Fire-Burnt Areas: Identification among Other Wildfires," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 1, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/rs14010194>.
- [7] B. Utomo, B. A. Yusmiono, A. P. Prasetya, M. Julita, dan M. K. Putri, "Analisis Tingkat Bahaya Karhutla (Kebakaran Hutan dan Lahan) di Kabupaten Ogan Ilir Provinsi Sumatera Selatan," *J. Wil. dan Lingkungan*, vol. 10, no. 1, hal. 31–41, 2022, doi: <https://doi.org/10.14710/jwl.10.1.30-41>.
- [8] P. W. Akbar, K. M. Sobri, dan R. Putra, "Pendekatan Holistik Implementasi Kebijakan Pemerintah Daerah Dalam Mitigasi Kebakaran Hutan dan Lahan di Kabupaten Ogan Ilir," *Publikauma J. Adm. Publik Univ. Medan Area*, vol. 12, no. 2, hal. 94–105, 2024, doi: <https://doi.org/10.31289/publika.v12i2.11613>.
- [9] I. S. Albores dkk., "Continental-scale Atmospheric Impacts of the 2020 Western U.S. Wildfires," *Atmos. Environ.*, vol. 294, hal. 119436, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119436>.
- [10] H. Kinoshita dkk., "Carbon monoxide poisoning," *Toxicol. Reports*, vol. 7, hal. 169–173, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.01.005>.
- [11] M. Afzal dkk., "Carbon Monoxide Poisoning: Diagnosis, Prognostic Factors, Treatment Strategies, and Future Perspectives," *Diagnostics*, vol. 15, no. 5, hal. 1–21, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/diagnostics15050581>.
- [12] I. R. Van Der Velde dkk., "Biomass burning combustion efficiency observed from space using measurements of CO and NO2 by the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI)," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, no. 2, hal. 597–616, 2021, doi: <https://doi.org/10.5194/acp-21-597-2021>.

- [13] L. Zhang *dkk.*, “The Impact of Long-Range Transport of Biomass Burning Emissions in Southeast Asia on Southern China,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 13, no. 7, hal. 1–13, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13071029>.
- [14] M. Filonchyk, M. P. Peterson, dan D. Sun, “Deterioration of air quality associated with the 2020 US wildfires,” *Sci. Total Environ.*, vol. 826, hal. 154103, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154103>.
- [15] S. A. Meo, A. A. Abukhalaf, A. A. Alomar, O. M. Alessa, W. Sami, dan D. C. Klonoff, “Effect of environmental pollutants PM-2.5, carbon monoxide, and ozone on the incidence and mortality of SARS-COV-2 infection in ten wildfire affected counties in California,” *Sci. Total Environ.*, vol. 757, hal. 143948, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143948>.
- [16] H. R. Naqvi *dkk.*, “Wildfire-induced pollution and its short-term impact on COVID-19 cases and mortality in California,” *Gondwana Res.*, vol. 114, hal. 30–39, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.04.016>.
- [17] L. V. Rizzo dan M. C. F. V. Rizzo, “Wildfire smoke and health impacts: a narrative review,” *J. Pediatr. (Rio. J.)*, vol. 101, hal. S56–S64, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpmed.2024.11.006>.
- [18] C. H. Wang, S. C. Shao, K. C. Chang, M. J. Hung, C. C. Yang, dan S. C. Liao, “Quantifying the Effects of Climate Factors on Carbon Monoxide Poisoning: A Retrospective Study in Taiwan,” *Front. Public Heal.*, vol. 9, no. October, hal. 1–7, 2021, doi: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.718846>.
- [19] T. Handhayani, “An Integrated Analysis of Air Pollution and Meteorological Conditions in Jakarta,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, hal. 1–11, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32817-9>.
- [20] S. Dimitroulopoulou *dkk.*, “Indoor Air Quality Guidelines From Across the World: An Appraisal Considering Energy Saving, Health, Productivity, and Comfort,” *Environ. Int.*, vol. 178, no. August, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108127>.
- [21] United States Environmental Protection Agency, “No Title,” 2025. [Daring]. Tersedia pada: [Environmental health inequalities in Europe: second assessment report](https://www.epa.gov/health-inequalities/Environmental%20health%20inequalities%20in%20Europe%3A%20second%20assessment%20report)
- [22] S. Sangkham, S. Thongtip, dan P. Vongruang, “Influence of Air Pollution and Meteorological Factors on The Spread of COVID-19 in The Bangkok Metropolitan Region and Air Quality During The Outbreak,” *Environ. Res.*, vol. 24, hal. 111104, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111104>.
- [23] H. Dastour, M. R. Ahmed, dan Q. K. Hassan, “Analysis of forest fire patterns and their relationship with climate variables in Alberta’s natural subregions,” *Ecol. Inform.*, vol. 80, hal. 102531, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102531>.

- [102531](https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.3.403-413).
- [24] H. Akhsan, M. Irfan, Supari, dan I. Iskandar, "Dynamics of Extreme Rainfall and Its Impact on Forest and Land Fires in the Eastern Coast of Sumatra," *Sci. Technol. Indones.*, vol. 8, no. 3, hal. 403–413, 2023, doi: <https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.3.403-413>.
- [25] H. Atalay, A. F. Sunar, dan A. Dervisoglu, "Spatial Autocorrelation Analysis of CO and NO₂ Related to Forest Fire Dynamics," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 14, no. 2, hal. 1–29, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi14020065>.
- [26] N. Ejaz dan S. Choudhury, "A comprehensive survey of the machine learning pipeline for wildfire risk prediction and assessment," *Ecol. Inform.*, vol. 90, hal. 103325, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103325>.
- [27] S. Ravindra Babu, C. F. Ou-Yang, S. M. Griffith, S. K. Pani, S. S. K. Kong, dan N. H. Lin, "Transport Pathways of Carbon Monoxide From Indonesian Fire Pollution to a Subtropical High-Altitude Mountain Site in The Western North Pacific," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, no. 8, hal. 4727–4740, 2023, doi: <https://doi.org/10.5194/acp-23-4727-2023>.
- [28] I. Demanega, I. Mujan, B. C. Singer, A. S. Anđelković, F. Babich, dan D. Licina, "Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions," *Build. Environ.*, vol. 187, hal. 107415, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>.
- [29] S. G. Muqita, W. Indrasari, H. Suhendar, dan M. A. Marpaung, "Karakterisasi Dan Pengujian Sensor Mq-7 Dan Mq-136 Untuk Pengembangan Sistem Monitoring Konsentrasi Gas Karbon Monoksida (Co) Dan Sulfur Dioksida (So₂)," in *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2018*, 2024, hal. 87–92, doi: <https://doi.org/10.21009/03.1201.FA13>.
- [30] Y. Kang, L. Aye, T. D. Ngo, dan J. Zhou, "Performance evaluation of low-cost air quality sensors: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 818, hal. 151769, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151769>.
- [31] M. A. Marquez-Vera, M. Martinez-Quezada, R. Calderon-Suarez, A. Rodriguez, dan R. M. Ortega-Mendoza, "Microcontrollers programming for control and automation in undergraduate biotechnology engineering education," *Digit. Chem. Eng.*, vol. 9, hal. 100122, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100122>.
- [32] T. L. Narayana dkk., "Advances in real time smart monitoring of environmental parameters using IoT and sensors," *Heliyon*, vol. 10, hal. e28195, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28195>.
- [33] I. Usrah, F. M. S. Nursuwars, S. E. Sanjaya, dan A. U. Rahayu, "Sistem

- Monitoring Karbon Monoksida dengan Metode Wireless Sensor Network (WSN) Berbasis Internet of Things (IoT),” *E-JOINT (Electronica Electr. J. Innov. Technol.*, vol. 4, no. 1, hal. 21–27, 2023, doi: <https://doi.org/10.35970/e-joint.v4i1.1904>.
- [34] M. N. A. Ramadan, M. A. H. Ali, S. Y. Khoo, M. Alkhedher, dan M. Alherbawi, “Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 283, hal. 116856, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116856>.

