KAMPUS AKADEMIK PUBLISING
Jurnal Multidisiplin Ilmu Akademik (JMIA)
Vol.3, No.6 Desember 2026
e-ISSN: 3032-7377, p-ISSN : 3032-7385, Hal 80-92
DOI : https://doi.org/10.61722/jmia.v3i6.13319

Monitoring Indikatif Karbon Monoksida Berbasis *IoT* pada Area Operasional Proyek Jalan Tol

M. Dirga Irmantiar
Universitas Indo Global Mandiri
Alamat: Jl. Jend. Sudirman Km.4 No. 62, 20 Ilir D. IV, Kec. Ilir Tim. I, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30129
Korespondensi penulis: muhammaddirga633@gmail.com

Abstract *Carbon monoxide (CO) is a hazardous gas generated by incomplete combustion from heavy equipment, generators, and operational vehicles used in construction projects. This study aimed to identify the indicative concentration of CO, analyze its temporal variation, evaluate the measurement results against the occupational exposure limit, and formulate control recommendations for operational areas of a toll road construction project. A quantitative descriptive design was applied using an Internet of Things-based monitoring system consisting of an ESP32 microcontroller and an MQ-9 gas sensor. Measurements were conducted for eight working hours in the vacuum, parking, and Workshop areas from 13 to 17 April 2026. The data were analyzed using minimum, maximum, average, and trend values. The results showed fluctuating CO concentrations associated with operational activities. The highest interval average was 19.42 ppm in the parking area, while the highest recorded sensor value was 23 ppm. All indicative measurements were below the 25 ppm occupational exposure limit stipulated in Indonesian Minister of Manpower Regulation No. 5 of 2018. However, because the MQ-9 sensor was not validated against a calibrated industrial instrument, the results should be interpreted as trend information rather than absolute exposure values. Routine equipment maintenance, vehicle emission control, periodic monitoring, and administrative controls are recommended.*
Keywords: *carbon monoxide; construction project; ESP32; Internet of Things; MQ-9*

Abstrak Karbon monoksida (CO) merupakan gas berbahaya yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna pada alat berat, genset, dan kendaraan operasional proyek konstruksi. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi konsentrasi indikatif CO, menganalisis variasi temporal, mengevaluasi hasil pengukuran terhadap Nilai Ambang Batas (NAB), serta menyusun rekomendasi pengendalian pada area operasional proyek jalan tol. Penelitian menggunakan desain deskriptif kuantitatif dengan sistem monitoring berbasis Internet of Things yang terdiri atas mikrokontroler ESP32 dan sensor MQ-9. Pengukuran dilakukan selama delapan jam kerja pada area vakum, parkir, dan *Workshop* pada 13–17 April 2026. Data dianalisis berdasarkan nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan kecenderungan perubahan. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi CO berfluktuasi mengikuti aktivitas operasional. Rata-rata interval tertinggi sebesar 19,42 ppm ditemukan di area parkir, sedangkan nilai sensor tertinggi mencapai 23 ppm. Seluruh hasil indikatif berada di bawah NAB 25 ppm berdasarkan Permenaker Nomor 5 Tahun 2018. Namun, karena sensor MQ-9 belum divalidasi terhadap alat industri terkalibrasi, hasil perlu ditafsirkan sebagai informasi kecenderungan, bukan nilai pajanan absolut. Pengendalian yang disarankan meliputi perawatan peralatan, pengendalian emisi kendaraan, pemantauan berkala, dan penguatan pengendalian administratif.
Kata Kunci: ESP32; Internet of Things; karbon monoksida; keselamatan dan kesehatan kerja; proyek konstruksi

1. PENDAHULUAN

Karbon monoksida (CO) merupakan gas beracun, tidak berwarna, dan tidak berbau yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar yang mengandung karbon. Sifatnya yang tidak dapat dikenali secara langsung menyebabkan keberadaan CO di lingkungan kerja perlu dipantau menggunakan instrumen pengukuran. Karbon monoksida memiliki afinitas terhadap hemoglobin sekitar 200–250 kali lebih besar dibandingkan oksigen sehingga dapat membentuk karboksihemoglobin dan menghambat distribusi oksigen ke jaringan tubuh (Zhou et al., 2018) (Nañagas et al., 2022; Rose et al., 2017) Paparan CO dapat menimbulkan keluhan berupa sakit

Naskah Masuk: 04 November 2026; Revisi: 05 November 2026; Diterima: 06 November 2026; Terbit: 16 November 2026

kepala, pusing, mual, kelelahan, gangguan konsentrasi, hingga gangguan kardiovaskular dan neurologis.

Proyek konstruksi jalan tol memiliki berbagai sumber emisi CO, antara lain alat berat, genset, pompa, *dump truck*, kendaraan operasional, dan kendaraan pekerja. Intensitas emisi dapat berubah berdasarkan jumlah alat yang beroperasi, kondisi mesin, durasi penggunaan, mobilitas kendaraan, serta kondisi lingkungan seperti sirkulasi udara, arah angin, dan kecepatan angin. Walaupun sebagian besar kegiatan konstruksi berlangsung di area terbuka, konsentrasi polutan tetap berpotensi meningkat pada area dengan aktivitas kendaraan atau peralatan berbahan bakar fosil yang tinggi.

Pengendalian faktor kimia di lingkungan kerja di Indonesia mengacu pada Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja. Secara internasional, evaluasi bahaya CO juga perlu mempertimbangkan pedoman kualitas udara dan nilai pajanan kerja yang relevan (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2024) Regulasi tersebut menetapkan NAB karbon monoksida sebesar 25 ppm untuk pajanan rata-rata selama delapan jam kerja. Nilai tersebut dapat digunakan sebagai acuan awal dalam mengevaluasi kondisi lingkungan kerja. Namun, evaluasi harus mempertimbangkan metode pengukuran, karakteristik instrumen, durasi pengukuran, dan validitas data.

Pemantauan kualitas udara secara berkala dengan instrumen konvensional dapat memberikan informasi kondisi pada waktu tertentu. Perkembangan pemantauan kualitas udara berbiaya rendah memungkinkan pengamatan yang lebih luas dan mendekati waktu nyata, tetapi kualitas datanya tetap harus dievaluasi (Fishbain et al., 2017). Sebaliknya, sistem berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan data dikumpulkan secara kontinu sehingga fluktuasi konsentrasi dapat diamati berdasarkan waktu dan lokasi (Morawska et al., 2018). ESP32 memiliki konektivitas Wi-Fi dan dapat digunakan untuk membaca data sensor serta mengirimkannya ke media penyimpanan daring. Sensor MQ-9 merupakan sensor berbiaya rendah yang dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan relatif konsentrasi CO (Karagulian et al., 2019; Mahajan & Kumar, 2020), meskipun penggunaannya sebagai alat ukur higiene industri memerlukan kalibrasi dan validasi terhadap instrumen standar.

Penelitian terdahulu telah membahas pemantauan CO berbasis ESP32 dan sensor seri MQ, baik pada area parkir, lingkungan kampus, maupun ruang tertutup (Hidayati, 2024; Hirzan et al., 2024; Khatami Fahmi Putra et al., 2024) Penelitian lain menunjukkan bahwa aktivitas kendaraan dan faktor meteorologi dapat memengaruhi konsentrasi CO di sekitar proyek jalan tol (Suhardono et al., 2025). Namun, penelitian yang menganalisis kecenderungan konsentrasi CO pada beberapa area operasional internal proyek jalan tol dari perspektif keselamatan dan kesehatan kerja masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis konsentrasi indikatif CO pada area vakum, parkir, dan Workshop menggunakan sistem monitoring berbasis ESP32 dan MQ-9.

Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi konsentrasi indikatif CO, menganalisis pola perubahan konsentrasi berdasarkan waktu dan lokasi, mengevaluasi hasil pengukuran terhadap NAB, serta menyusun rekomendasi pengendalian paparan CO pada area operasional proyek jalan tol.

2. KAJIAN TEORI

Karbon monoksida terbentuk ketika bahan bakar tidak terbakar sempurna. Mesin dan kendaraan non-jalan yang digunakan dalam pekerjaan konstruksi dapat menjadi sumber emisi CO dan polutan lain (Song et al., 2023). Pada proyek konstruksi, sumber pembentukan CO terutama berasal dari mesin diesel dan bensin yang digunakan pada alat berat, genset, pompa, dan kendaraan. Konsentrasi CO di lingkungan kerja dipengaruhi oleh jumlah sumber emisi, kondisi pembakaran, jarak pekerja dari sumber, durasi operasi, serta kemampuan lingkungan dalam mendispersikan gas.

Paparan CO dapat mengurangi kemampuan darah dalam mengangkut oksigen karena pembentukan karboksihemoglobin. Paparan kerja yang lebih tinggi dan berlangsung lebih lama berhubungan dengan meningkatnya perhatian terhadap dampak kesehatan pekerja (Jadoon et al., 2022; Rizaldi et al., 2022). Dampak kesehatan dipengaruhi oleh konsentrasi, lama pajanan, aktivitas fisik, dan kondisi kesehatan pekerja. Oleh sebab itu, pengendalian CO perlu menjadi bagian dari manajemen risiko keselamatan dan kesehatan kerja.

IoT memungkinkan sensor, mikrokontroler, jaringan komunikasi, dan media penyimpanan bekerja dalam satu sistem (Mota et al., 2025). Dalam penelitian ini, sensor MQ-9 menghasilkan sinyal yang dibaca oleh ESP32. Data selanjutnya dikirimkan melalui jaringan internet ke Google Spreadsheet untuk direkap dan dianalisis. Sistem tersebut dapat membantu identifikasi perubahan relatif konsentrasi CO secara kontinu.

Sensor MQ-9 merupakan sensor berbiaya rendah dengan sensitivitas terhadap CO dan beberapa gas mudah terbakar lainnya. Platform sensor berbiaya rendah perlu diuji dan dikalibrasi karena kinerjanya dapat bervariasi antarunit dan kondisi lingkungan (Castell et al., 2017). Oleh karena itu, pembacaan sensor perlu dipahami secara hati-hati. Tanpa kalibrasi menggunakan gas standar atau perbandingan dengan alat terverifikasi, nilai yang dihasilkan belum dapat diperlakukan sebagai nilai pajanan absolut. Sistem lebih tepat digunakan untuk mengamati kecenderungan, perubahan, dan perbandingan relatif antarwaktu atau lokasi.

Evaluasi dalam penelitian ini menggunakan NAB CO sebesar 25 ppm berdasarkan Permenaker Nomor 5 Tahun 2018. Perbandingan tersebut digunakan sebagai evaluasi indikatif, bukan sebagai pengganti pengukuran higiene industri yang dilakukan dengan instrumen terkalibrasi.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif untuk menggambarkan konsentrasi indikatif CO berdasarkan lokasi dan waktu pengukuran. Penelitian dilaksanakan pada area operasional proyek jalan tol di STA 46–48, Provinsi Sumatera Selatan, pada 13–17 April 2026. Lokasi pengukuran terdiri atas area vakum, area parkir, dan area *Workshop*. Pengukuran dilakukan selama jam kerja, yaitu sekitar pukul 09.00–17.00 WIB, dengan durasi pengamatan delapan jam pada setiap hari pengukuran.

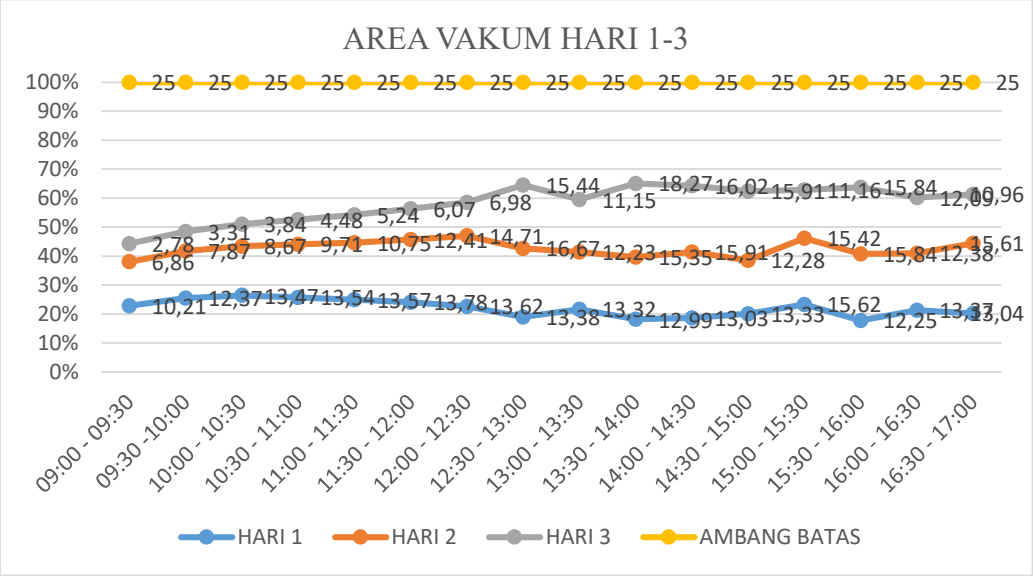
Sistem monitoring terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor gas MQ-9, sumber daya, kotak pelindung, kabel konektor, serta jaringan internet. ESP32 digunakan untuk membaca sinyal sensor dan mengirimkan data melalui Wi-Fi ke *Google Spreadsheet*. Data direkam secara berkala dengan interval sekitar 30 detik sampai satu menit. Sensor ditempatkan pada titik yang dianggap mewakili kondisi setiap area, yaitu di sekitar sumber emisi dan aktivitas pekerja. Area vakum diwakili oleh titik di sekitar genset dan pompa air, area parkir diwakili oleh titik tengah jalur keluar-masuk kendaraan, sedangkan area *Workshop* diwakili oleh titik tengah area aktivitas pendukung.

Data primer berupa nilai pembacaan CO, waktu pengukuran, tanggal, dan lokasi. Data sekunder berupa informasi aktivitas operasional serta NAB CO berdasarkan Permenaker Nomor 5

Tahun 2018. Data mentah dikelompokkan berdasarkan lokasi dan waktu. Nilai pembacaan kemudian diringkas dalam bentuk nilai minimum, maksimum, dan rata-rata pada setiap interval pengamatan. Analisis dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan nilai rata-rata dan nilai maksimum terhadap NAB serta mengamati kecenderungan perubahan konsentrasi. Karena sensor MQ-9 belum dikalibrasi dan divalidasi terhadap alat ukur industri, satuan ppm yang ditampilkan oleh sistem diperlakukan sebagai nilai indikatif. Hasil penelitian tidak dimaksudkan untuk menyatakan tingkat pajanan pekerja secara absolut, melainkan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan konsentrasi berdasarkan lokasi dan waktu

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Pola Perubahan Konsentrasi CO Pada Area Vakum



Hasil pengukuran konsentrasi karbon monoksida (CO) di area vakum selama tiga hari menunjukkan pola perubahan yang bervariasi. Pada hari pertama, konsentrasi mengalami kenaikan dari 10,21 ppm pada awal pengukuran hingga mencapai puncak 15,62 ppm pada pukul 15.00–15.30 WIB. Setelah itu, konsentrasi menurun hingga akhir pengamatan. Pola ini menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi secara bertahap sebelum terjadi penurunan. Perubahan tersebut diduga berkaitan dengan variasi aktivitas operasional, termasuk penggunaan genset dan alat berat yang berpotensi menghasilkan emisi CO.

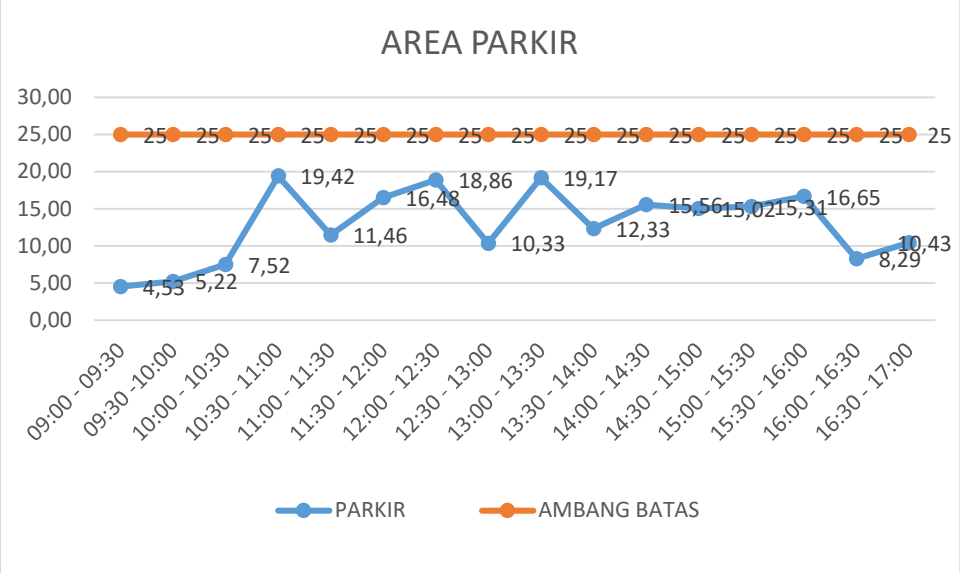
Pada hari kedua, konsentrasi CO meningkat dari 6,86 ppm pada awal pengukuran hingga mencapai 16,67 ppm pada pukul 12.30–13.00 WIB. Setelah mencapai puncak, konsentrasi mengalami kenaikan dan penurunan selama sisa waktu pengamatan. Pola ini menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi tidak berlangsung secara konsisten, melainkan mengalami fluktuasi yang mungkin dipengaruhi oleh perubahan intensitas aktivitas operasional dan emisi dari peralatan bermesin di sekitar titik pengukuran.

Pada hari ketiga, konsentrasi CO meningkat dari 2,78 ppm pada awal pengukuran hingga mencapai puncak 18,27 ppm pada pukul 13.30–14.00 WIB, kemudian menurun dan kembali mengalami fluktuasi. Rentang kenaikan dari nilai awal hingga puncak pada hari ketiga merupakan yang terbesar di antara ketiga hari pengamatan. Kondisi ini mengindikasikan adanya perubahan konsentrasi yang cukup besar selama periode pengukuran. Aktivitas genset dan alat berat di sekitar titik pengukuran dapat menjadi faktor yang perlu diperhatikan, meskipun hubungan

langsung antara aktivitas tersebut dan perubahan konsentrasi belum dapat dipastikan tanpa data aktivitas operasional yang terukur.

Secara keseluruhan, pola pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi CO di area vakum mengalami kenaikan dan penurunan sepanjang periode pengamatan, dengan waktu puncak yang berbeda setiap hari. Variasi tersebut dapat berkaitan dengan perubahan aktivitas sumber emisi di area proyek. Namun, karena pengukuran menggunakan sensor MQ-9 belum divalidasi terhadap instrumen standar, hasilnya perlu ditafsirkan sebagai indikasi pola perubahan konsentrasi CO.

2. Pola Perubahan Konsentrasi CO Pada Area Parkir



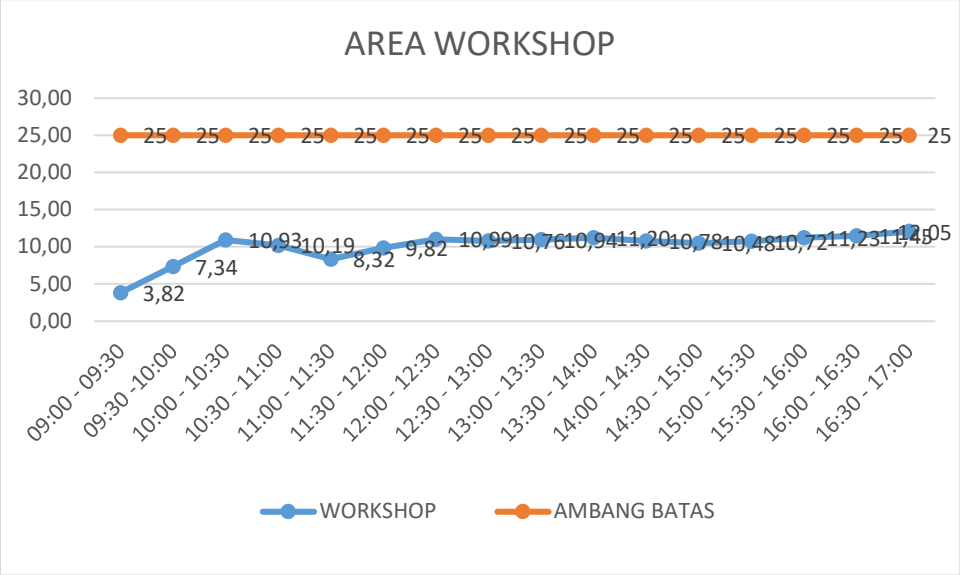
Hasil pengukuran karbon monoksida (CO) di Area Parkir menunjukkan pola konsentrasi yang berfluktuasi selama periode pengamatan. Pola pemantauan pada area parkir juga relevan untuk dikaji karena emisi kendaraan dapat menyebabkan variasi konsentrasi CO pada ruang atau area dengan aktivitas kendaraan (Raihan et al., 2025). Pada awal pengukuran, konsentrasi rata-rata tercatat sebesar 4,53 ppm, kemudian meningkat secara bertahap menjadi 5,22 ppm dan 7,52 ppm. Peningkatan tajam terjadi pada pukul 10.30–11.00 WIB hingga mencapai 19,42 ppm. Setelah itu, konsentrasi menurun menjadi 11,46 ppm pada pukul 11.00–11.30 WIB, kemudian kembali mengalami kenaikan dan penurunan. Puncak konsentrasi berikutnya tercatat sebesar 18,86 ppm pada pukul 12.00–12.30 WIB dan 19,17 ppm pada pukul 13.00–13.30 WIB.

Pola kenaikan dan penurunan tersebut diduga berkaitan dengan perubahan aktivitas kendaraan bermotor di area parkir. Kendaraan yang keluar masuk atau beroperasi dengan mesin menyala dapat menghasilkan emisi CO dari proses pembakaran bahan bakar. (Alala et al., 2024) menjelaskan bahwa konsentrasi CO di area parkir berkaitan dengan jumlah kendaraan yang beroperasi. Namun, karena jumlah kendaraan dan aktivitas mesin tidak diukur secara bersamaan dalam penelitian ini, aktivitas kendaraan belum dapat dipastikan sebagai penyebab langsung setiap peningkatan konsentrasi.

Setelah beberapa kali mencapai nilai tinggi pada siang hari, konsentrasi CO cenderung menurun menjelang sore. Pada pukul 16.00–16.30 WIB, konsentrasi tercatat sebesar 8,29 ppm, kemudian meningkat kembali menjadi 10,43 ppm pada pukul 16.30–17.00 WIB. Perubahan ini menunjukkan bahwa konsentrasi CO tidak menurun secara konsisten, tetapi tetap mengalami fluktuasi hingga akhir pengamatan. Kenaikan kembali pada interval terakhir dapat mengindikasikan adanya perubahan kondisi sumber emisi, meskipun penyebab spesifiknya belum dapat dipastikan berdasarkan data pengukuran yang tersedia.

Secara keseluruhan, konsentrasi CO di Area Parkir berada pada rentang 4,53–19,42 ppm, dengan beberapa puncak yang terjadi pada pagi menjelang siang hingga awal siang hari. Pola tersebut memperlihatkan adanya variasi konsentrasi selama jam operasional. Berdasarkan Permenaker Nomor 5 Tahun 2018, NAB CO adalah 25 ppm sehingga nilai tertinggi yang tercatat masih berada 5,58 ppm di bawah batas tersebut. Meskipun demikian, hasil ini perlu ditafsirkan secara hati-hati karena sensor MQ-9 belum divalidasi terhadap instrumen standar. Dengan demikian, hasil pengukuran menggambarkan pola perubahan konsentrasi CO selama pengamatan, tetapi belum cukup untuk memastikan tingkat paparan pekerja secara menyeluruh.

3. Pola Perubahan Konsentrasi CO Pada Area *Workshop*



Hasil pengukuran karbon monoksida (CO) di Area *Workshop* menunjukkan pola perubahan konsentrasi yang relatif stabil, meskipun terdapat kenaikan dan penurunan pada beberapa interval waktu. Pada awal pengukuran, konsentrasi CO tercatat sebesar 3,82 ppm, kemudian meningkat menjadi 7,34 ppm pada pukul 09.30–10.00 WIB dan 10,93 ppm pada pukul 10.00–10.30 WIB. Setelah peningkatan awal tersebut, konsentrasi berfluktuasi dalam rentang yang relatif terbatas hingga sore hari. Pada periode pukul 10.00–16.00 WIB, konsentrasi tercatat berkisar antara 8,32–11,45 ppm. Pola ini menunjukkan bahwa setelah peningkatan pada awal pengamatan, konsentrasi CO cenderung bertahan pada kisaran yang serupa tanpa lonjakan tajam.

Perubahan konsentrasi tersebut dapat berkaitan dengan aktivitas operasional di area Workshop, terutama apabila terdapat penggunaan kendaraan atau peralatan bermesin yang menghasilkan emisi dari pembakaran bahan bakar. Kajian paparan emisi mesin diesel pada pekerjaan infrastruktur mendukung pentingnya memperhatikan peralatan bermesin di lokasi konstruksi. (Izzati et al., 2025) menjelaskan bahwa sumber CO di lingkungan kerja dapat berasal dari kendaraan bermotor dan peralatan berbahan bakar fosil. Paparan emisi mesin diesel juga telah diamati pada pekerjaan infrastruktur konstruksi (Ferree et al., 2024; Ziembicki et al., 2022). Selain keberadaan sumber emisi, kondisi ventilasi dan proses penyebaran polutan di udara juga dapat memengaruhi konsentrasi CO yang terukur (Morawska et al., 2018; Salthammer, 2024). Namun, karena aktivitas sumber emisi dan kondisi ventilasi tidak diukur secara bersamaan, faktor-faktor tersebut belum dapat dipastikan sebagai penyebab langsung pola perubahan konsentrasi dalam penelitian ini.

Menjelang akhir pengamatan, konsentrasi CO menunjukkan kecenderungan meningkat, dari 10,72 ppm pada pukul 15.00–15.30 WIB hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 12,05 ppm

pada pukul 16.30–17.00 WIB. Kenaikan ini menunjukkan bahwa konsentrasi CO masih mengalami perubahan meskipun secara umum pola pengukurannya relatif stabil. Peningkatan tersebut mungkin berkaitan dengan perubahan aktivitas operasional atau kondisi sumber emisi menjelang akhir jam pengamatan, tetapi diperlukan data pendukung untuk memastikan faktor yang memengaruhinya.

Secara keseluruhan, konsentrasi CO di Area *Workshop* berada pada rentang 3,82–12,05 ppm. Pola pengukuran memperlihatkan peningkatan pada awal pengamatan, fluktuasi yang relatif terbatas pada sebagian besar periode pengukuran, serta kenaikan kembali menjelang akhir pengamatan. Seluruh nilai yang terbaca oleh sensor berada di bawah NAB CO sebesar 25 ppm berdasarkan Permenaker Nomor 5 Tahun 2018. Meskipun demikian, karena sensor MQ-9 belum divalidasi terhadap instrumen standar, hasil ini perlu ditafsirkan sebagai gambaran pola perubahan konsentrasi CO selama pengamatan dan belum dapat dijadikan bukti tunggal bahwa paparan pekerja sepenuhnya aman.

4. Variasi Konsentrasi Karbon Monoksida Berdasarkan Lokasi Pengukuran

Hasil pengukuran menunjukkan adanya variasi konsentrasi CO pada seluruh lokasi. Variasi tersebut terlihat dari perubahan nilai rata-rata pada setiap interval pengamatan. Konsentrasi cenderung meningkat ketika aktivitas alat berat, genset, pompa, atau kendaraan berlangsung lebih intensif. Model emisi kendaraan dan kajian kualitas udara di sekitar aktivitas transportasi menunjukkan bahwa intensitas serta karakteristik sumber emisi perlu dipertimbangkan ketika menafsirkan perubahan CO (Gumilar et al., 2024). Sebaliknya, konsentrasi menurun ketika aktivitas sumber emisi berkurang atau ketika proses dispersi udara berlangsung lebih baik.

Pada area vakum, pengukuran dilakukan selama tiga hari. Rata-rata konsentrasi pada hari pertama berada pada rentang 10,21–15,62 ppm. Nilai rata-rata tertinggi pada hari pertama sebesar 15,62 ppm terjadi pada pukul 15.00–15.30 WIB. Pada hari kedua, rata-rata konsentrasi berada pada rentang 6,86–16,67 ppm, dengan nilai rata-rata tertinggi pada pukul 12.30–13.00 WIB. Pada hari ketiga, rata-rata konsentrasi berada pada rentang 2,78–18,27 ppm, dengan nilai tertinggi pada pukul 13.30–14.00 WIB.

Perbedaan pola antar hari menunjukkan bahwa konsentrasi CO tidak hanya dipengaruhi oleh lokasi, tetapi juga oleh aktivitas yang berlangsung pada hari pengukuran. Area vakum memiliki genset dan pompa yang beroperasi untuk mendukung pekerjaan *vacuum consolidation.* Mesin tersebut berpotensi menjadi sumber emisi CO. Perubahan jumlah peralatan yang aktif, durasi operasi, kondisi mesin, dan sirkulasi udara dapat menjelaskan terjadinya fluktuasi konsentrasi.

Area parkir menunjukkan rentang rata-rata konsentrasi sebesar 4,53–19,42 ppm. Nilai rata-rata tertinggi terjadi pada pukul 10.30–11.00 WIB sebesar 19,42 ppm. Nilai relatif tinggi juga ditemukan pada pukul 12.00–12.30 WIB sebesar 18,86 ppm dan pukul 13.00–13.30 WIB sebesar 19,17 ppm. Pola tersebut diduga berkaitan dengan mobilitas kendaraan yang keluar dan masuk area parkir. Kendaraan yang berhenti dalam kondisi mesin menyala atau mengalami antrean dapat meningkatkan emisi pada titik tertentu.

Area *Workshop* menunjukkan rentang rata-rata konsentrasi sebesar 3,82–12,05 ppm. Nilai terendah terjadi pada pukul 09.00–09.30 WIB, sedangkan nilai tertinggi terjadi pada pukul 16.30–17.00 WIB. Dibandingkan area vakum dan parkir, pola di *Workshop* cenderung lebih stabil. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh aktivitas sumber emisi yang lebih rendah serta sirkulasi udara yang relatif lebih baik.

5. Perbandingan Hasil Pengukuran Terhadap NAB

Ringkasan rata-rata hasil pengukuran disajikan pada tabel 1.

Lokasi Pengukuran	Rata-rata	Nilai Maksimum pada interval (PPM)	NAB (PPM)
Area vakum Hari pertama	13,03	16,97	25
Area Vakum Hari Kedua	12,83	21,00	25
Area Vakum hari ketiga	10,12	20,00	25
Area Parkir	12,70	23,00	25
Area *Workshop*	10,18	15,00	25

Berdasarkan Tabel 1, seluruh nilai rata-rata dan nilai maksimum pada interval pengukuran berada di bawah NAB sebesar 25 ppm. Nilai rata-rata tertinggi berdasarkan pengelompokan lokasi-hari terdapat pada area vakum hari pertama sebesar 13,03 ppm. Namun, nilai rata-rata interval tertinggi ditemukan di area parkir sebesar 19,42 ppm. Selain itu, nilai sensor maksimum yang tercatat dalam seluruh rangkaian pengukuran adalah 23 ppm pada area parkir.

Perbedaan antara rata-rata keseluruhan, rata-rata interval, dan nilai maksimum perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Nilai rata-rata menggambarkan kecenderungan konsentrasi dalam suatu periode, sedangkan nilai maksimum menunjukkan pembacaan tertinggi yang terjadi pada interval tertentu. Dengan demikian, area parkir perlu mendapatkan perhatian karena memiliki lonjakan konsentrasi dan nilai maksimum sensor yang relatif tinggi, sementara area vakum juga perlu diprioritaskan karena terdapat sumber emisi genset, pompa, dan aktivitas alat berat.

Jika nilai pembacaan sensor digunakan sebagai pembanding indikatif terhadap NAB, nilai maksimum 23 ppm berada di bawah 25 ppm. Namun, selisih yang relatif kecil antara nilai tersebut dan NAB menunjukkan perlunya pengendalian preventif. Selain itu, ketidakpastian sensor MQ-9, pengaruh suhu dan kelembapan, serta belum dilakukannya validasi dengan instrumen standar menyebabkan hasil tidak dapat dijadikan dasar tunggal untuk menyatakan bahwa pajanan pekerja sepenuhnya aman.

6. IMPLIKASI K3 DAN REKOMENDASI PENGENDALIAN

Hasil monitoring menunjukkan adanya perubahan konsentrasi karbon monoksida (CO) selama periode pengukuran pada area operasional proyek jalan tol. Temuan ini sejalan dengan penelitian di sekitar pembangunan jalan tol yang menempatkan faktor lingkungan dan aktivitas sekitar sebagai hal penting dalam interpretasi konsentrasi CO (Suhardono et al., 2025). Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya pemantauan lingkungan kerja secara berkala untuk membantu mengidentifikasi kecenderungan peningkatan konsentrasi CO. Mengingat CO merupakan gas beracun yang tidak berwarna dan tidak berbau, pemantauan menggunakan instrumen pengukuran menjadi salah satu upaya pendukung dalam mengidentifikasi potensi bahaya kimia di lingkungan kerja (Izzati et al., 2025). Dalam konteks Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), informasi hasil monitoring dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk mengevaluasi aktivitas operasional dan menentukan tindakan pengendalian yang sesuai.

Rekomendasi pengendalian perlu disesuaikan dengan karakteristik aktivitas pada setiap area pengukuran. Pada Area Vakum, pengendalian dapat difokuskan pada pemeriksaan dan pemeliharaan rutin genset, pompa, serta alat berat untuk menjaga kondisi operasional dan mengurangi potensi emisi dari proses pembakaran. Selain itu, penempatan sumber emisi perlu dipertimbangkan agar tidak terlalu dekat dengan lokasi pekerja beraktivitas. Pada Area Parkir, pengendalian dapat dilakukan melalui pengaturan arus kendaraan, pembatasan kebiasaan membiarkan mesin menyala ketika kendaraan tidak digunakan, serta pengaturan posisi parkir untuk mengurangi kedekatan sumber emisi dengan pekerja. Sementara itu, pada Area *Workshop*, pemeriksaan berkala terhadap kendaraan dan peralatan bermesin serta pengaturan aktivitas penggunaan mesin dapat menjadi langkah untuk mengendalikan potensi emisi di sekitar area kerja.

Rekomendasi tersebut sejalan dengan prinsip *hierarchy of controls* yang dijelaskan oleh *National Institute for Occupational Safety and Health* (National Institute For Occupational Safety and Health, 2024), yaitu eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, pengendalian administratif, dan alat pelindung diri. Mengingat penggunaan kendaraan dan alat berat merupakan bagian dari kegiatan operasional proyek, pengendalian dapat diprioritaskan melalui upaya rekayasa teknik dan administratif yang memungkinkan diterapkan. Upaya tersebut meliputi pemeliharaan peralatan secara terjadwal, pemeriksaan kondisi mesin dan emisi, pengaturan aktivitas kendaraan, serta penyusunan prosedur tindak lanjut apabila hasil monitoring menunjukkan kecenderungan peningkatan konsentrasi CO.

Penerapan pengendalian juga perlu didukung oleh sistem manajemen K3 yang terencana dan terdokumentasi. Penggunaan sistem sensor dan jaringan nirkabel untuk memberi peringatan bahaya gas pada proyek konstruksi telah ditunjukkan oleh (Cheung et al., 2018). (ISO 45001, 2018) menekankan pentingnya identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan pengendalian risiko dalam sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja. Dalam hal ini, sistem monitoring berbasis ESP32 dan sensor MQ-9 dapat dimanfaatkan sebagai alat bantu untuk mengamati kecenderungan perubahan konsentrasi CO dan mendukung pengambilan keputusan operasional. Pemanfaatan teknologi dalam manajemen keselamatan konstruksi juga dibahas oleh (Guo et al., 2017), khususnya dalam mendukung identifikasi bahaya dan pengelolaan keselamatan berbasis informasi.

Meskipun demikian, hasil *monitoring* dalam penelitian ini perlu ditafsirkan dengan mempertimbangkan keterbatasan sensor MQ-9 yang belum divalidasi terhadap instrumen standar terkalibrasi. Oleh karena itu, data yang diperoleh lebih tepat digunakan untuk mengamati kecenderungan perubahan konsentrasi CO, bukan sebagai satu-satunya dasar untuk menetapkan tingkat paparan pekerja atau memastikan kondisi lingkungan kerja aman. Pengukuran lanjutan menggunakan instrumen terkalibrasi diperlukan untuk memverifikasi hasil *monitoring* sebelum dilakukan evaluasi paparan secara lebih pasti.

7. KETERBATASAN PENELITIAN

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil pengukuran. Pertama, sensor MQ-9 yang digunakan dalam sistem *monitoring* berbasis ESP32 belum divalidasi menggunakan instrumen pengukuran CO standar yang terkalibrasi. Oleh karena itu, hasil pengukuran dalam penelitian ini lebih tepat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan konsentrasi CO daripada menentukan nilai paparan absolut di lingkungan kerja.

Kedua, pengukuran dilakukan pada titik tertentu di area operasional proyek jalan tol selama periode pengamatan yang telah ditentukan. Keterbatasan representativitas spasial dan kebutuhan kalibrasi lapangan merupakan isu umum pada sensor kualitas udara berbiaya rendah (Karagulian et al., 2019; Spinelle et al., 2016). Dengan demikian, hasil penelitian belum sepenuhnya menggambarkan kondisi konsentrasi CO pada seluruh titik di area proyek maupun pada periode operasional yang berbeda. Selain itu, penelitian ini belum mengukur secara kuantitatif intensitas aktivitas kendaraan dan alat berat yang berpotensi menjadi sumber emisi CO. Kondisi tersebut membatasi kemampuan penelitian dalam memastikan hubungan sebab-akibat antara aktivitas operasional dan perubahan konsentrasi CO yang terukur.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi sensor MQ-9 menggunakan instrumen CO terkalibrasi, memperluas titik dan periode pengukuran, serta mencatat aktivitas kendaraan dan alat berat selama pengambilan data. Pengukuran faktor lingkungan, seperti arah dan kecepatan angin, juga dapat dipertimbangkan untuk membantu menjelaskan variasi konsentrasi CO. Upaya tersebut diharapkan dapat meningkatkan keandalan hasil pengukuran dan mendukung evaluasi risiko paparan CO di lingkungan kerja secara lebih akurat.

8. KESIMPULAN

Sistem monitoring berbasis ESP32 dan sensor MQ-9 dapat digunakan untuk mengamati kecenderungan perubahan konsentrasi karbon monoksida (CO) pada area operasional proyek jalan tol. Hasil pengukuran menunjukkan adanya fluktuasi konsentrasi CO selama periode pengamatan, dengan rata-rata interval tertinggi sebesar 19,42 ppm pada area parkir dan nilai pembacaan maksimum sensor sebesar 23 ppm. Berdasarkan pembacaan indikatif tersebut, seluruh hasil berada di bawah Nilai Ambang Batas (NAB) CO sebesar 25 ppm yang mengacu pada Permenaker Nomor 5 Tahun 2018.

Temuan ini menunjukkan bahwa sistem monitoring dapat mendukung pemantauan kondisi lingkungan kerja dan membantu mengidentifikasi kecenderungan peningkatan konsentrasi CO. Rekomendasi pengendalian meliputi pemeliharaan rutin peralatan bermesin, pengendalian emisi kendaraan, pengaturan aktivitas operasional, dan pemantauan lingkungan kerja secara berkala. Namun, karena sensor MQ-9 belum divalidasi menggunakan instrumen standar terkalibrasi, hasil pengukuran belum dapat digunakan untuk menetapkan nilai paparan CO secara absolut. Penelitian selanjutnya perlu melakukan validasi sensor dan mempertimbangkan pengukuran faktor lingkungan serta aktivitas operasional untuk meningkatkan keandalan evaluasi konsentrasi CO di lingkungan kerja.

DAFTAR PUSTAKA

Alala, P. S., Arifianto, D. D., Setyaning, A., & Poesoko, S. (2024). *Analysis of Ambient Air Quality of Carbon Monoxide in Parking Areas : Case Study of Type B and Type C Hospitals in Surabaya City*. *22*, 157–161. https://doi.org/10.31284/j.jtm.2024.v5i2.6035

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2024). *TLVs® and BEIs®: Threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices*.

Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality

monitoring and exposure estimates? *Environment International*, *99*, 293–302. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007

Cheung, W., Lin, T., & Lin, Y. (2018). *A Real-Time Construction Safety Monitoring System Network and Building Information Modeling Technologies*. https://doi.org/10.3390/s18020436

Ferree, P. L., Polat, M., Nøjgaard, J. K., & Jensen, K. A. (2024). *Airborne particulate matter and diesel engine exhaust on infrastructure construction sites in the Copenhagen metropolitan area*. *August*, 791–803.

Fishbain, B., Lerner, U., Castell, N., Cole-Hunter, T., Popoola, O., Broday, D. M., Martinez Iñiguez, T., Nieuwenhuijsen, M., Jovasevic-Stojanovic, M., Topalovic, D., Jones, R. L., Galea, K. S., Etzion, Y., Kizel, F., Golumbic, Y. N., Baram-Tsabari, A., Yacobi, T., Robinson, J. A., Kocman, D., … Bartonova, A. (2017). An evaluation tool kit of air quality micro-sensing units. *Science of the Total Environment*, *575*, 639–648. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.061

Gumilar, S. T., Wambraw, M. Y. B., & Bahtiar, P. (2024). Model Emisi Karbon Monoksida Pada Kendaraan Akibat Aktivitas Transportasi di Ruas Jalan Taruna Bhakti – Jalan Kamwolker Perumnas III Kota Jayapura. *Konstruksi: Publikasi Ilmu Teknik, Perencanaan Tata Ruang Dan Teknik Sipil*, *2*(4), 237–259.

Guo, H., Yu, Y., & Skitmore, M. (2017). Visualization technology-based construction safety management: A review. *Automation in Construction*, *73*, 135–144. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.004

Hidayati, R. (2024). Sistem Pemantauan Kualitas Udara Secara Real-Time Menggunakan Esp32 Dan Teknologi Iot. *Djtechno: Jurnal Teknologi Informasi*, *5*(2), 232–245. https://doi.org/10.46576/djtechno.v5i2.4619

Hirzan, A. M., Adhiwibowo, W., & Daru, A. F. (2024). Pemantauan Tingkat Karbon Monoksida Dengan Sensor Mq-9 Studi Kasus Universitas Semarang. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Komunikasi*, *15*(2), 215–222. https://doi.org/10.51903/jtikp.v15i2.741

ISO 45001. (2018). Occupational Health and Safety Management System (OHSMS) ISO 45001-2018. *Www.Spindo.Com*, 85. https://drive.google.com/file/d/1ym3gi7ur-HhifF6gouMKeJJufhAqCx2H/view

Izzati, M. A., Soeprihatini, R. A., & Komala, R. (2025). Paparan Karbon Monoksida pada Lingkungan Kerja dan Dampak terhadap Kesehatan : Literature Review Carbon Monoxide Exposure in the Workplace and Impact on Health : Literature Review. *Medula*, *14*(11), 2085–2089.

Jadoon, S., Nawazish, S., Mahmood, Q., Rafique, A., Sohail, S., & Zaidi, A. (2022). Exploring

Health Impacts of Occupational Exposure to Carbon Monoxide in the Labour Community of Hattar Industrial Estate. *Atmosphere*, *13*(3), 1–15. https://doi.org/10.3390/atmos13030406

Karagulian, F., Barbiere, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., & Borowiak, A. (2019). *Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring*.

Khatami Fahmi Putra, M., Zainul, L. M., Rusba, K., Nawawi, Y., Studi Keselamatan dan Kesehatan Kerja, P., & Vokasi, F. (2024). Inovasi K3: Integrasi AI dan IoT untuk Meningkatkan Keselamatan Kerja. *R2J*, *6*(5). https://doi.org/10.38035/rrj.v6i5

Mahajan, S., & Kumar, P. (2020). Evaluation of low-cost sensors for quantitative personal exposure monitoring. *Sustainable Cities and Society*, *57*(November 2019), 102076. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102076

Moon, J., & Ju, B. K. (2024). Wearable Sensors for Healthcare of Industrial Workers: A Scoping Review. In *Electronics (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/electronics13193849

Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., … Williams, R. (2018). *Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment : How far have they gone ? 116*(February 2018), 286–299. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018

Mota, A., Serôdio, C., Briga-Sá, A., & Valente, A. (2025). Implementation of an Internet of Things Architecture to Monitor Indoor Air Quality: A Case Study During Sleep Periods. *Sensors*, *25*(6). https://doi.org/10.3390/s25061683

Nañagas, K. A., Penfound, S. J., & Kao, L. W. (2022). Carbon Monoxide Toxicity. *Emergency Medicine Clinics of NA*, *40*(2), 283–312. https://doi.org/10.1016/j.emc.2022.01.005

National Institute For Occupational Safety and Health. (2024, April 10). *About Hierarchy of Controls*. Https://Www.Cdc.Gov/Niosh/Hierarchy-of-Controls/about/Index.Html.

Raihan, M., Novriyenni, & Saragih, R. (2025). *Rancang Bangun Sistem Monitoring Emisi Gas Buang Pada Ruang Parkir Bawah Tanah Gedung Perkantoran Menggunakan Internet of Things (IoT)*. *3*(1), 7–14.

Rizaldi, M. A., Azizah, R., Latif, M. T., Sulistyorini, L., & Salindra, B. P. (2022). Literature Review: Dampak Paparan Gas Karbon Monoksida Terhadap Kesehatan Masyarakat yang Rentan dan Berisiko Tinggi. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, *21*(3), 253–265. https://doi.org/10.14710/jkli.21.3.253-265

Rose, J. J., Wang, L., Xu, Q., Mctiernan, C. F., Shiva, S., Tejero, J., & Gladwin, M. T. (2017). *Carbon Monoxide Poisoning : Pathogenesis , Management , and Future Directions of Therapy*. *195*(5), 596–606. https://doi.org/10.1164/rccm.201606-1275CI

Salthammer, T. (2024). *Atmospheres Environmental Science : Carbon monoxide as an indicator of indoor air*. 291–305. https://doi.org/10.1039/d4ea00006d

Song, Z., Li, Y., & Hu, J. (2023). Directional Torsion Sensor Based on a Two-Core Fiber with a Helical Structure. *Sensors*, *23*(6). https://doi.org/10.3390/s23062874

Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2016). Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part. B: NO, CO and CO2. *Sensors & Actuators: B. Chemical*. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036

Suhardono, S., Setyaputri, A. F., Ramadhani, D. D., Pratiwi, V. M. R., & Suryawan, I. W. K. (2025). Analisa Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Konsentrasi Karbon Monoksida di Sekitar Pembangunan Jalan Tol Solo-Jogja. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *23*(2), 427–434. https://doi.org/10.14710/jil.23.2.427-434

Zhou, S., Holscher, C. M., Massie, A. B., Segev, D. L., & Nicholas, L. H. (2018). Correlation Between Kidney Transplant Outcome Metrics and Waitlist Metrics. In *Transplantation* (Vol. 102, Issue 8, pp. e362–e363). Lippincott Williams and Wilkins. https://doi.org/10.1097/TP.0000000000002254

Ziembicki, S., Kirkham, T. L., Demers, P. A., Peters, C. E., Gorman-ng, M., Davies, H. W., Tenkate, T., Kalenge, S., Blagrove-hall, N., Jardine, K. J., & Arrandale, V. H. (2022). *Diesel Engine Exhaust Exposure in the Ontario Civil Infrastructure Construction Industry*. *66*(2), 150–162.