

Pengembangan Perangkat Deteksi Gas CO di Kabin Mobil Berbasis ESP32 dan Sensor MQ-7

Development of a CO Gas Detection Device in a Car Cabin Based on ESP32 and MQ-7 Sensor

¹Fikri Bangun Nugraha, ¹Novita Sari*) dan ¹Hari Boedi Wahjono

¹Teknologi Rekayasa Otomotif, Politeknik Transportasi Darat Indonesia, Bekasi, 17520, Indonesia

*) corresponding email: novita.s@ptdisttd.ac.id

Abstrak

Gas karbon monoksida (CO) tergolong racun yang tak berwarna maupun berbau, sehingga keberadaannya sukar dikenali pancaindra manusia secara langsung. Di dalam kabin kendaraan, paparan CO berpotensi mengganggu kesehatan pengguna, apalagi saat arus lalu lintas padat memicu penumpukan sisa gas buang. Riset ini bertujuan merancang sekaligus mewujudkan alat pendeteksi CO untuk kabin kendaraan berbasis mikrokontroler ESP32 dan sensor MQ-7, yang dilengkapi tiga bentuk notifikasi yakni visual, audio, dan haptik. Pendekatan *Research and Development (R&D)* dengan model 4D digunakan sebagai kerangka penelitian. Uji coba mencakup dua tahap, yaitu pengujian respons alat dan pengujian kinerjanya di dalam kendaraan pada dua skenario: kondisi normal dan simulasi kemacetan. Dari hasil pengujian, diperoleh waktu deteksi rata-rata 26,46 detik, waktu pengaktifan notifikasi 5,32 detik, serta *delay* pembacaan sensor 2,79 detik. Pada uji kinerja, kadar CO tercatat mencapai 9,9 ppm untuk kondisi normal dan 20,5 ppm saat simulasi kemacetan. Alat yang dibangun terbukti mampu mengenali kenaikan konsentrasi CO secara *real-time* serta memberi peringatan dini bagi pengguna kendaraan.

Kata Kunci: ESP32, kabin mobil, karbon monoksida, MQ-7, notifikasi haptik

Abstract

Carbon monoxide (CO) is an invisible, odorless toxic gas that human senses cannot easily identify on their own. Inside a vehicle cabin, exposure to this gas may threaten occupant health, especially when dense traffic conditions allow exhaust emissions to build up. This work focuses on designing and building a cabin-based CO monitoring device that relies on an ESP32 microcontroller together with an MQ-7 sensor, combined with visual, audio, and haptic alerts. A Research and Development (R&D) method following the 4D model guided the project. Two testing phases were carried out: assessing the device's response and evaluating its on-vehicle performance across normal and simulated-congestion scenarios. Findings show an average detection time of 26.46 seconds, a notification-activation time of 5.32 seconds, and a sensor reading delay of 2.79 seconds. During performance testing, CO levels reached 9.9 ppm in normal conditions and climbed to 20.5 ppm under simulated congestion. Overall, the device can track rising CO concentrations in real time and issue early warnings to vehicle occupants.

Keywords: car cabin, carbon monoxide, ESP32, haptic notification, MQ-7

Makalah diterima 15 Juli 2026 – makalah direvisi 08 September 2026 – disetujui 05 Oktober 2026

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



1 Pendahuluan

Meningkatnya jumlah kendaraan bermotor menyebabkan masyarakat menghabiskan waktu yang semakin lama di dalam kabin kendaraan, terutama saat menghadapi kepadatan lalu lintas atau kemacetan. Dalam kondisi tersebut, kabin kendaraan berfungsi sebagai ruang tertutup dengan kualitas udara yang dipengaruhi oleh interaksi antara polutan dari lingkungan sekitar, emisi kendaraan itu sendiri, serta sistem ventilasi yang digunakan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa konsentrasi polutan seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan partikulat di dalam kabin sangat dipengaruhi oleh kondisi lalu lintas, pertukaran udara antara lingkungan luar dan kabin, serta pengaturan ventilasi kendaraan. Pada kondisi tertentu, konsentrasi polutan tersebut dapat melebihi nilai acuan kualitas udara sehingga berpotensi meningkatkan risiko kesehatan bagi pengguna kendaraan [1],[2],[3],[4]. Emisi gas buang kendaraan bermotor merupakan salah satu sumber utama karbon monoksida (CO) di lingkungan jalan raya. Gas CO dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna dan menjadi salah satu polutan yang paling banyak

dijumpai pada emisi kendaraan bermotor. Pada kondisi lalu lintas padat atau kemacetan, peningkatan konsentrasi CO di sekitar kendaraan dapat meningkatkan risiko *infiltrasi* gas ke dalam kabin sehingga memperbesar potensi paparan terhadap pengemudi dan penumpang [5],[6].

Salah satu jenis polutan yang patut diwaspadai adalah karbon monoksida (CO), gas beracun yang tak kasat mata, tak berbau, dan tak berasa, sehingga manusia sulit mengenalinya tanpa alat bantu [7],[8]. Gas ini muncul akibat pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna di dalam mesin kendaraan bermotor [9],[10]. Secara karakteristik, gas CO memiliki massa jenis yang sedikit lebih ringan dari udara, sehingga sangat mudah berdifusi dan terakumulasi di dalam ruang tertutup seperti kabin mobil. Daya ikat CO terhadap hemoglobin diketahui 200–250 kali lebih besar dibandingkan oksigen, sehingga distribusi oksigen ke jaringan tubuh dapat terhambat dan memicu hipoksia [11],[12].

Mengingat daya ikatnya terhadap hemoglobin yang sangat tinggi, penetapan standar keselamatan paparan gas ini diatur secara ketat. Berdasarkan panduan kualitas udara dari *World Health Organization* (WHO), Nilai Ambang Batas (NAB) rata-rata paparan gas CO yang masih dapat ditoleransi oleh manusia untuk durasi waktu 8 jam adalah sebesar 9 ppm. Sementara itu, untuk paparan jangka pendek yang akut, Kadar Tertinggi yang Diperkenankan (KTD) ditetapkan sebesar 50 ppm. Apabila konsentrasi melampaui KTD, paparan dapat memicu sakit kepala akut, disorientasi, hingga hilangnya kesadaran secara mendadak. Ancaman ini didukung oleh berbagai laporan forensik yang menunjukkan bahwa akumulasi gas buang di dalam kabin kendaraan yang berhenti masih berpotensi menimbulkan keracunan serius hingga kematian [13],[14],[15].

Untuk mengantisipasi bahaya tersebut, pemilihan komponen pendeteksi yang tepat menjadi faktor krusial. Dalam penelitian ini, sensor MQ-7 dipilih karena sangat sensitif terhadap gas CO pada rentang konsentrasi 20 hingga 2000 ppm, yang sangat relevan dengan parameter NAB dan KTD di dalam kabin. Sensor ini beroperasi menggunakan material semikonduktor oksida logam berupa timah dioksida (SnO_2). Karakteristik utamanya adalah mengalami penurunan resistansi listrik secara signifikan saat terjadi reaksi reduksi-oksidasi akibat paparan CO [16]. Di samping sensitivitasnya yang tinggi, sensor MQ-7 memiliki waktu pakai yang panjang, stabil pada berbagai variasi suhu kabin, serta hemat biaya, menjadikannya sangat ideal untuk diintegrasikan ke dalam sistem peringatan dini berbasis mikrokontroler portabel. Berbagai studi terdahulu terkait sistem pendeteksi gas CO berbasis sensor MQ-7 memperlihatkan bahwa sensor ini sanggup memantau konsentrasi gas secara *real-time* [17],[18],[19].

Meskipun demikian, keandalan sebuah sistem peringatan dini tidak hanya bergantung pada media notifikasinya, tetapi juga pada akurasi algoritma kalibrasi dan kecepatan respons sensor. Untuk menjamin tingkat presisi dan akurasi, proses kalibrasi sensor MQ-7 perlu divalidasi secara empiris menggunakan instrumen pengukur standar profesional. Metode ini merujuk pada penelitian sebelumnya, dimana karakterisasi dan pengujian kinerja sensor gas MQ-7 terbukti efektif dilakukan dengan membandingkan nilai konsentrasi yang terukur oleh sensor terhadap pembacaan dari *gas analyzer* saat diekspos bersamaan pada kondisi lingkungan uji yang sama [20].

Selain akurasi, kinerja perangkat keselamatan sangat dipengaruhi oleh kecepatan sensor gas yang umumnya dievaluasi melalui waktu respons dan waktu pemulihan (*recovery time*). Waktu respons menunjukkan lama waktu yang dibutuhkan sensor untuk mencapai sekitar 90% dari perubahan sinyal akhir setelah terpapar gas target, sedangkan waktu pemulihan menunjukkan durasi yang dibutuhkan sensor untuk kembali mendekati kondisi awal setelah paparan gas dihentikan. Penelitian Galvani *et al.* [21] menunjukkan bahwa sensor gas berbasis nanostruktur mampu mencapai waktu respons dan pemulihan di bawah 10 detik, sangat bergantung pada material aktif, konsentrasi gas, serta suhu operasi. Pada aplikasi pendeteksian CO, material $\text{TiO}_2\text{-CeO}_2$ berpori dilaporkan memiliki waktu respons 2 detik dan waktu pemulihan 6 detik, sedangkan sensor $\text{Au/In}_2\text{O}_3$ menunjukkan waktu respons 2 detik dan pemulihan 10 detik. Untuk memastikan bahwa perangkat keras yang dirancang mampu mendeteksi bahaya secara akurat dan instan di dalam kabin, oleh karena itu perlu dilakukan pengujian kalibrasi dan respons sistem.

Meskipun demikian, mayoritas penelitian tersebut baru menyampaikan hasil pemantauan lewat tampilan visual atau bunyi alarm (*buzzer*) saja, sehingga aspek efektivitas peringatan bagi pengguna yang kewaspadaannya menurun akibat paparan CO belum banyak dibahas. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan akan sistem peringatan yang mampu menyampaikan informasi melalui lebih dari satu media notifikasi agar potensi bahaya dapat diketahui dengan lebih efektif. Berdasarkan penelitian terdahulu mengenai sistem deteksi gas karbon monoksida (CO) pada kabin mobil, sebagian besar sistem telah memanfaatkan sensor gas untuk mendeteksi peningkatan konsentrasi CO dan memberikan peringatan kepada pengguna melalui dua bentuk notifikasi, yaitu *buzzer* sebagai indikator audio dan layar LCD sebagai indikator visual. Namun, penggunaan kedua bentuk notifikasi tersebut masih memiliki keterbatasan, terutama ketika pengemudi atau penumpang mengalami penurunan kesadaran akibat paparan CO. Gas CO yang

terhirup dapat berikatan dengan hemoglobin sehingga menghambat distribusi oksigen ke jaringan tubuh dan organ vital, yang pada paparan lebih dari 8 jam dapat menyebabkan gangguan kesadaran [15],[22],[23].

Gangguan kesadaran akibat paparan gas CO menunjukkan perlunya mekanisme peringatan tambahan yang tidak hanya mengandalkan rangsangan suara dan visual. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem dengan menambahkan vibrator sebagai notifikasi haptik yang dipasang pada *headrest* kendaraan. Getaran yang dihasilkan diharapkan dapat memberikan rangsangan fisik secara langsung kepada pengguna sehingga meningkatkan kewaspadaan ketika terdeteksi peningkatan konsentrasi CO. Keefektifan notifikasi haptik ini didasarkan pada mekanisme sistem saraf *somatosensori* yang mampu memproses rangsangan fisik secara lebih cepat dan refleksif dibandingkan indera penglihatan maupun pendengaran. Menurut penelitian Noubissie Tientcheu *et al.* [24], sinyal getaran (*vibrotactile*) terbukti secara signifikan memangkas waktu reaksi dan secara efektif mampu membangkitkan kembali tingkat kesadaran pengemudi meskipun sedang mengalami kejenuhan sensorik atau penurunan fokus akibat kelelahan. Penambahan notifikasi haptik ini menjadi aspek kebaruan penelitian dalam meningkatkan efektivitas sistem peringatan dini terhadap risiko paparan CO di dalam kabin mobil.

Riset ini merancang sistem pendeteksi gas CO berbasis ESP32 dan MQ-7 yang memadukan tiga bentuk notifikasi sekaligus, yakni visual, audio, dan haptik. Kendaraan jenis *Multi-Purpose Vehicle* (MPV) merupakan salah satu segmen kendaraan yang paling banyak digunakan sebagai kendaraan keluarga di Indonesia, sehingga implementasi sistem pada penelitian ini dilakukan pada kabin mobil jenis MPV. Selain itu, kabin kendaraan merupakan ruang tertutup (*microenvironment*) yang berpotensi mengalami akumulasi polutan udara akibat infiltrasi emisi kendaraan maupun penggunaan sistem sirkulasi udara tertutup [1],[3].

Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi performa sistem peringatan dini pendeteksi gas karbon monoksida (CO) yang telah dikembangkan untuk ruang kabin kendaraan. Evaluasi kinerja instrumen ini diukur secara kuantitatif melalui serangkaian pengujian, diawali dengan memvalidasi tingkat akurasi pembacaan konsentrasi gas terhadap instrumen referensi baku (*gas analyzer*). Parameter selanjutnya yang diukur adalah kecepatan waktu respons sistem, yang mencakup durasi deteksi gas, aktivasi notifikasi haptik, dan *delay* komputasi. Selanjutnya, perangkat diuji secara komprehensif guna menilai efektivitas aktuasi peringatannya secara *real-time* di dalam ruang kabin, baik pada skenario lalu lintas normal maupun simulasi kemacetan. Secara keseluruhan, pengujian spesifik ini diharapkan mampu membuktikan keandalan operasional alat sebagai upaya preventif untuk meminimalkan risiko fatal paparan gas beracun bagi pengemudi dan penumpang.

2 Metode

Metode Penelitian dan Pengembangan (*Research and Development*) dengan model 4D yang mencakup tahap *Define* (Pendefinisian), *Design* (perancangan), *Develop* (pengembangan), dan *Disseminate* (penyebarluasan) dipilih sebagai kerangka kerja untuk merancang, membangun, dan menerapkan sistem deteksi gas CO pada kabin kendaraan berbasis ESP32 dan MQ-7. Tahap *Define* (Pendefinisian) merupakan tahap awal dalam model pengembangan 4D yang bertujuan untuk mengidentifikasi permasalahan dan menganalisis kebutuhan sistem sebagai dasar pengembangan perangkat deteksi gas CO di kabin mobil. Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap kondisi lapangan yang menunjukkan potensi bahaya paparan gas karbon monoksida (CO) di dalam kabin kendaraan akibat kebocoran gas buang atau sirkulasi udara yang kurang baik. Selanjutnya dilakukan identifikasi kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak, meliputi penggunaan sensor MQ-7 sebagai pendeteksi gas CO, mikrokontroler ESP32 sebagai pengolah data, serta media notifikasi berupa *buzzer*, LCD, dan vibrator. Selain itu, dilakukan kajian teori mengenai karakteristik gas CO, prinsip kerja sensor MQ-7, dan sistem monitoring berbasis ESP32 untuk menentukan spesifikasi dan fungsi perangkat yang akan dikembangkan sehingga sesuai dengan tujuan penelitian.

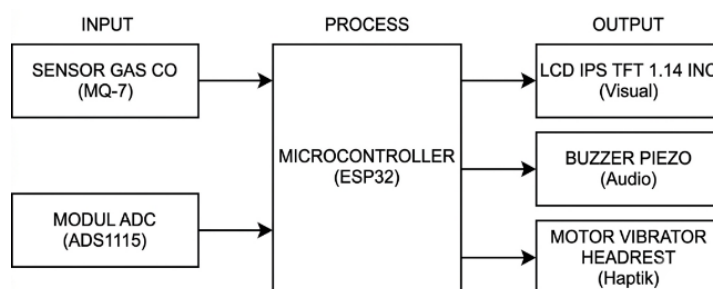
Tahap selanjutnya, adalah *Design* (perancangan), pada tahap ini susunan sistem dirancang dengan menggunakan sensor MQ-7 yang berfungsi mendeteksi konsentrasi gas CO, ESP32 sebagai unit pengendali utama, modul ADS1115 sebagai pengubah sinyal analog ke digital, LCD IPS TFT sebagai media penampil, serta *buzzer* dan motor vibrator sebagai perangkat notifikasi. Tahapan *Develop* (pengembangan) mencakup perancangan perangkat keras, pemrograman mikrokontroler melalui perangkat lunak, penggabungan seluruh komponen, hingga pemasangan alat pada kabin kendaraan sebelum masuk tahap *Disseminate* (penyebarluasan).

Pengujian sistem direalisasikan melalui tiga tahapan utama, yakni pengujian kalibrasi sensor, pengujian respons sistem, dan pengujian kinerja sistem. Tahap kalibrasi sensor sendiri terbagi menjadi dua langkah berurutan. Kalibrasi pertama dilakukan secara komputasi melalui konfigurasi parameter perangkat lunak menggunakan Arduino IDE. Selanjutnya, kalibrasi kedua dilaksanakan guna memvalidasi tingkat kesesuaian

pembacaan sensor MQ-7 terhadap instrumen referensi standar berupa *gas analyzer*, dengan mengekspos kedua perangkat pada kondisi lingkungan uji yang sama. Selanjutnya, pengujian respons sistem bertujuan untuk mengukur waktu deteksi gas, waktu aktivasi notifikasi, dan *delay* pembacaan sensor pada beberapa variasi titik uji konsentrasi CO. Terakhir, pengujian kinerja sistem dilakukan pada ruang kabin kendaraan sesungguhnya menggunakan dua skenario, yakni kondisi normal dan simulasi kemacetan. Pengujian ini dilaksanakan selama 60 menit dengan interval pengamatan setiap 10 menit guna mengevaluasi efektivitas aktuasi peringatan secara menyeluruh. Seluruh data hasil pengujian dari ketiga tahapan tersebut selanjutnya diolah secara statistik dan matematis pada tahap analisis data.

2.1 Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem ditujukan untuk menghasilkan prototipe pendeteksi CO pada kabin mobil yang dapat mengenali kenaikan konsentrasi gas secara *real-time* dan menyampaikan peringatan kepada pengguna melalui tiga jalur notifikasi visual, audio, dan haptik. Mikrokontroler ESP32 dipilih sebagai pusat kendali yang menghubungkan sensor MQ-7, modul ADS1115, LCD IPS TFT berukuran 1,14 inci, *buzzer*, serta motor vibrator, sehingga keseluruhan komponen dapat bekerja secara terpadu. Rancangan sistem secara utuh dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok sistem deteksi gas CO berbasis ESP32.

Diagram blok pada Gambar 1 menggambarkan susunan sistem deteksi gas CO di kabin mobil, yang terbagi menjadi tiga bagian pokok, yakni *input*, proses, dan *output*. Bagian *input* diisi oleh sensor MQ-7 yang menangkap konsentrasi gas CO, sementara modul ADS1115 bertugas mengubah sinyal analog dari sensor tersebut menjadi data digital dengan resolusi lebih baik. Data ini selanjutnya diolah oleh ESP32 untuk menentukan status kadar CO berdasarkan ambang yang telah ditetapkan sebelumnya. Keluaran dari proses tersebut ditampilkan melalui LCD IPS TFT 1,14 inci sebagai notifikasi visual, dibantu *buzzer* untuk notifikasi audio, serta motor vibrator pada *headrest* untuk notifikasi haptik. Integrasi ketiga jenis notifikasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan kewaspadaan pengguna kendaraan terhadap potensi paparan gas CO di dalam kabin.

2.2 Flowchart Alat

Diagram alir (*flowchart*) dibuat untuk menampilkan tahapan kerja sistem pendeteksi gas CO pada kabin mobil, dimulai dari proses inialisasi hingga pemberian notifikasi berdasarkan data yang dibaca sensor. Melalui diagram ini, keterkaitan antar proses dalam sistem menjadi lebih mudah dipahami sehingga mekanisme kerja perangkat dapat dijelaskan secara runtut. *Flowchart* lengkap dari sistem ditampilkan pada Gambar 2.

Gambar 2 menunjukkan *flowchart* sistem pemantauan keberadaan gas karbon monoksida (CO) pada ruang kabin mobil. Proses sistem dimulai dengan inialisasi seluruh perangkat keras, yaitu ESP32, sensor MQ-7, ADS1115, LCD TFT, *buzzer*, dan motor vibrator. Untuk merealisasikan alur kerja tersebut pada tahap eksekusi program (*looping*), mikrokontroler ESP32 melakukan akuisisi data secara kontinu melalui modul ADS1115 yang menerjemahkan sinyal analog dari sensor MQ-7 menjadi nilai digital (*raw ADC*). Sebelum dikonversi menjadi satuan konsentrasi gas, nilai mentah tersebut terlebih dahulu diolah melewati algoritma penyaring digital (*low-pass filter*) menggunakan metode *Exponential Moving Average* (EMA). Dengan menetapkan konstanta pemulusan (*smoothing factor*), k sebesar 0,04, sistem mampu meredam distorsi derau sinyal (*noise*) lingkungan sehingga lonjakan pembacaan dapat diratakan secara signifikan. Secara matematis, sebelum masuk ke tahapan kalibrasi konsentrasi, nilai *raw ADC* 15-bit dari modul ADS1115 pada dasarnya merepresentasikan tegangan keluaran sensor (V_{out}) yang dirumuskan sebagai berikut:

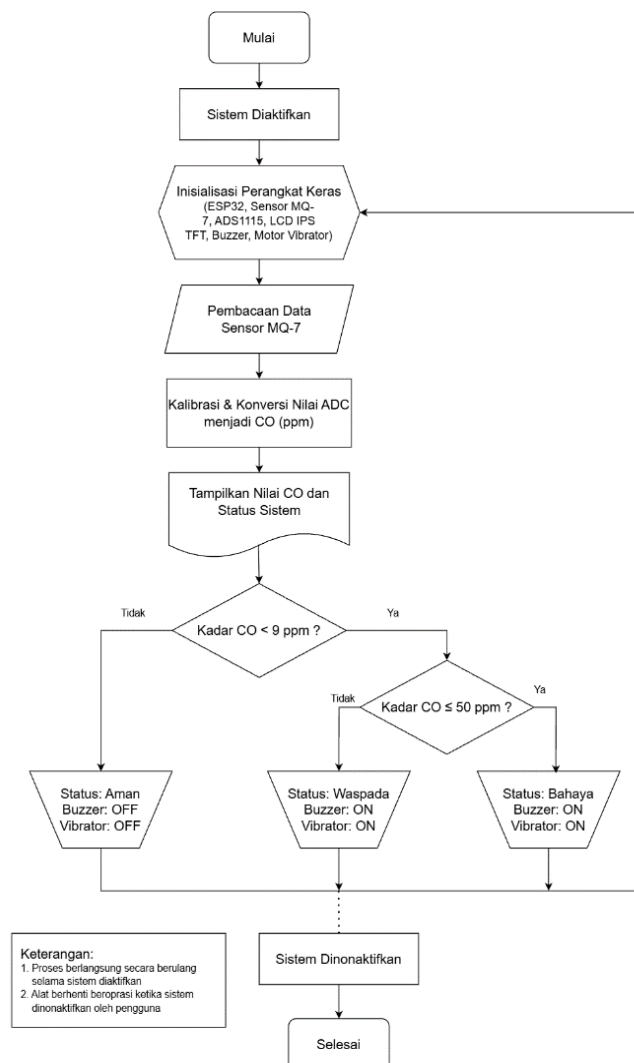
$$V_{out} = \frac{ADC \times V_{ref}}{2^{15} - 1} \quad (1)$$

di mana V_{ref} adalah tegangan referensi *Programmable Gain Amplifier* (PGA) yang digunakan. Untuk keperluan efisiensi komputasi *real-time* pada ESP32, nilai ADC yang telah distabilkan oleh filter EMA tersebut kemudian dipetakan secara langsung ke dalam persamaan kalibrasi regresi linier inversi berikut:

$$PPM = \frac{ADC - b}{m} \quad (2)$$

Nilai konstanta diperoleh secara empiris melalui kurva regresi linier dari hasil pengujian kalibrasi, yang memetakan respons pembacaan data mentah sensor terhadap nilai konsentrasi referensi dari *gas analyzer*. Perhitungan matematis ini dilakukan untuk mendapatkan representasi kadar gas CO yang akurat dan tervalidasi. Hasil kalkulasi akhir dalam satuan ppm tersebut lalu ditampilkan pada LCD TFT sekaligus diumpungkan ke dalam percabangan logika sistem untuk dibandingkan dengan ambang batas yang berlaku.

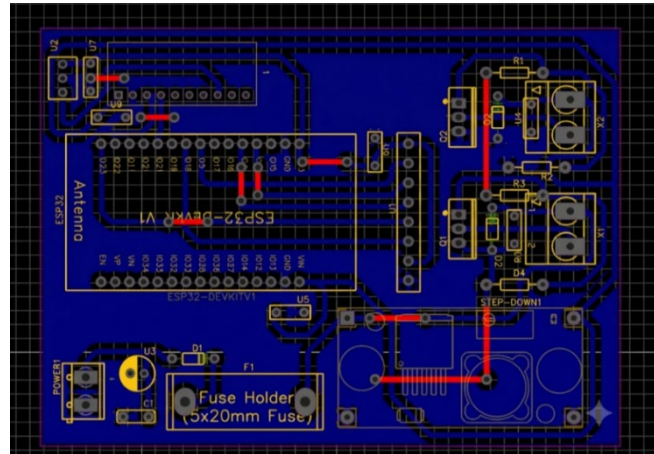
Penentuan ambang batas pada percabangan logika ini didasarkan pada panduan baku kualitas udara dari *World Health Organization* (WHO) [15]. Berdasarkan panduan tersebut, paparan CO hingga 9 ppm (setara 10 mg/m³ selama 8 jam) masih tergolong aman sehingga *buzzer* dan vibrator tetap nonaktif. Pada rentang 9–50 ppm, status berubah menjadi waspada dan kedua aktuator diaktifkan sebagai peringatan dini. Sementara itu, jika kadar CO melebihi 50 ppm, status berubah menjadi bahaya dengan *buzzer* dan vibrator tetap aktif, karena paparan pada konsentrasi tersebut berisiko menyebabkan hipoksia yang dapat memicu hilangnya kesadaran pengemudi secara mendadak [7], [8]. Siklus pembacaan, pemrosesan, dan aktuasi notifikasi ini berlangsung berulang secara *real-time* selama alat masih dioperasikan sampai sistem dinonaktifkan.



Gambar 2. Flowchart alat

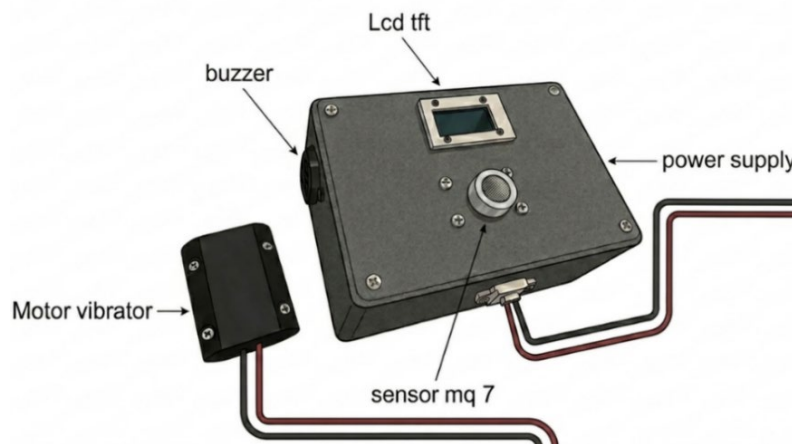
2.3 Desain Perancangan Sistem

Bagian perancangan sistem ini mencakup desain *layout* PCB serta bentuk fisik alat pendeteksi gas CO untuk kabin mobil. Tujuannya adalah menyatukan seluruh komponen inti sensor MQ-7, mikrokontroler ESP32, modul ADS1115, LCD IPS TFT, *buzzer*, dan motor vibrator menjadi satu sistem yang ringkas dan mudah dipasang pada kendaraan. Penyusunan desain memperhitungkan tata letak komponen, jalur kabel, kemudahan perakitan, serta efisiensi ruang, sehingga sistem dapat bekerja optimal dan andal ketika ditempatkan di dalam kabin mobil. Rincian desain perancangan sistem ini disajikan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Gambar 3. *Layout* PCB sistem deteksi gas CO berbasis ESP32

Gambar 3 memperlihatkan *blueprint layout* PCB yang menyatukan komponen-komponen inti sistem, yakni ESP32 DevKit V1 sebagai pengendali utama, modul ADS1115 sebagai pengubah sinyal analog ke digital, modul *step-down* sebagai penyedia catu daya, serta rangkaian driver untuk *buzzer* dan motor *vibrator*. Penataan komponen dan jalur PCB dibuat sederhana mungkin agar koneksi antarperangkat lebih rapi dan proses perakitan menjadi lebih mudah.

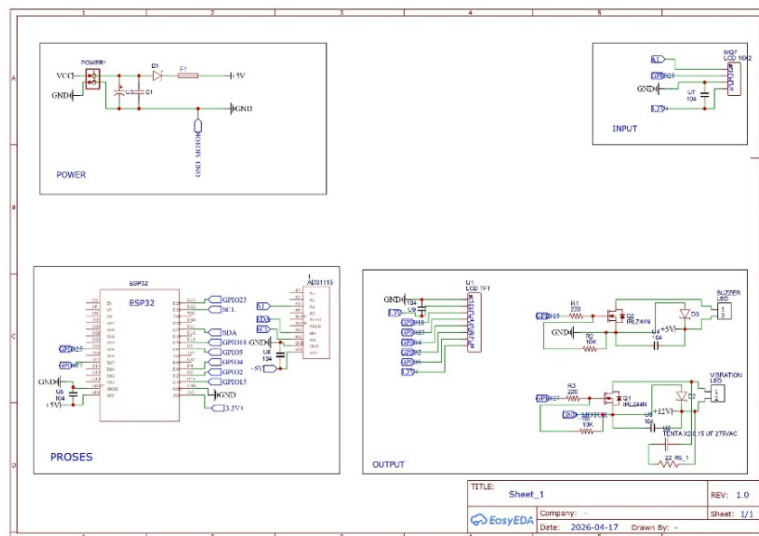


Gambar 4. Desain fisik alat deteksi gas CO pada kabin

Gambar 4 menunjukkan bentuk fisik alat di mana seluruh komponen ditempatkan dalam satu rumah perangkat (*casing*). Pada sisi depan *casing* terpasang sensor MQ-7 untuk membaca konsentrasi CO, layar TFT sebagai penampil informasi, serta *buzzer* sebagai sumber peringatan audio. Selain itu, terdapat pula modul *vibrator* eksternal yang dipasang pada *headrest* kendaraan, berfungsi memberikan peringatan haptik saat kadar CO melampaui ambang yang telah ditetapkan.

Gambar 5 memperlihatkan skematik perangkat keras sistem terdiri dari empat blok fungsional utama: catu daya, masukan, pemrosesan, dan keluaran. Sistem ditenagai oleh sumber 12V yang sebagian diturunkan menjadi 5V melalui modul *step-down* untuk menyuplai komponen mikrokontroler. Pada tahap pemrosesan, sinyal analog dari sensor MQ-7 terlebih dahulu dikonversi menjadi data digital oleh modul ADC ADS1115, kemudian ditransmisikan ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi I2C. Sebagai luaran, ESP32 menampilkan data kualitas udara pada layar LCD TFT secara *real-time*, sekaligus mengendalikan *buzzer* (5V)

dan motor vibrator (12V) menggunakan rangkaian penggerak berbasis sakelar MOSFET (IRLZ44N) yang dilengkapi dioda pengaman untuk melindungi sistem dari lonjakan arus beban induktif.



Gambar 5. Wiring diagram alat

2.4 Analisis Data

Metode deskriptif kuantitatif digunakan untuk mengolah data hasil pengujian guna menilai kinerja sistem pendeteksi CO yang telah dibangun. Analisis data pada riset ini dibagi menjadi tiga pendekatan matematis dan statistik yang disesuaikan dengan tahapan pengujian :

1. Analisis kalibrasi sensor

Pengujian kalibrasi pada alat ini dilaksanakan melalui dua tahapan. Tahap pertama adalah kalibrasi empiris, di mana nilai *Analog-to-Digital Converter* (ADC) dikonversi menjadi satuan konsentrasi gas menggunakan model persamaan regresi linier. Selanjutnya, tahap kedua merupakan proses validasi presisi yang dilakukan dengan cara mengkomparasikan hasil pembacaan sistem terhadap instrumen referensi standar bersertifikasi, yakni *gas analyzer*.

Tingkat kesesuaian pembacaan sensor MQ-7 dievaluasi dengan membandingkannya terhadap instrumen referensi *gas analyzer*. Instrumen standar yang digunakan pada penelitian ini adalah *gas analyzer* tipe 4-Gas bersertifikasi Kelas 0, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan spesifikasi teknisnya, perangkat ini menggunakan teknologi pembacaan sensor inframerah (infrared gas bench) yang mampu mengukur konsentrasi karbon monoksida (CO) secara presisi pada rentang ukur 0 hingga 5% volume. Alat ukur ini beroperasi dengan laju aliran gas (*flow rate*) nominal sebesar 6 liter/menit dan telah dilengkapi dengan sistem kompensasi tekanan udara pada rentang 750–1150 hPa, serta mampu bekerja optimal pada suhu lingkungan operasional antara -10°C hingga +55°C. Penggunaan instrumen dengan spesifikasi kelas industri ini memastikan bahwa nilai ukur pembanding yang digunakan bersifat baku dan valid.



Gambar 6. Perangkat *gas analyzer* berspesifikasi Kelas 0 untuk pengujian kalibrasi sensor MQ-7

Mengingat *gas analyzer* menampilkan data pembacaan dalam satuan persentase volume (%vol), nilai tersebut perlu dikonversi menjadi *Parts Per Million* (ppm) melalui persamaan:

$$CO(ppm) = CO(\%vol) \times 10.000 \quad (3)$$

Tingkat presisi alat kemudian dievaluasi dengan menghitung persentase kesalahan (*error*) dan tingkat akurasi menggunakan persamaan berikut:

$$Error(\%) = \frac{MQ - 7 - Gas\ Analyzer}{Gas\ Analyzer} \times 100\% \quad (4)$$

$$Akurasi = 100\% - \%Error \quad (5)$$

2. Analisis respons sistem

Data pengujian waktu deteksi gas, waktu aktivasi notifikasi, dan *delay* pembacaan dianalisis menggunakan regresi linier untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan waktu respons akibat peningkatan konsentrasi CO. Analisis ini menggunakan model persamaan estimasi:

$$Y = a + bX + \varepsilon \quad (6)$$

Nilai koefisien regresi (*b*) menunjukkan besaran rata-rata perubahan waktu respons (*Y*) untuk setiap satu satuan perubahan pada titik uji konsentrasi gas (*X*). Jika koefisien regresi bernilai positif, hal ini mengindikasikan bahwa waktu respons alat cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya paparan konsentrasi CO, dan sebaliknya. Selain itu, nilai koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar proporsi variasi waktu respons sistem yang dapat dijelaskan oleh perubahan konsentrasi gas pada model regresi tersebut.

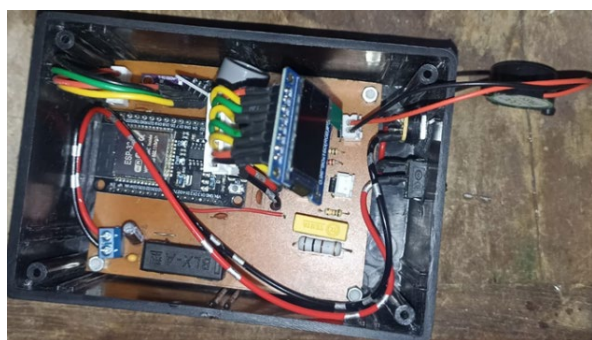
3. Analisis kinerja sistem pada kabin

Data pembaruan status sistem (Aman, Waspada, Bahaya) serta aktivasi *buzzer* dan vibrator dianalisis secara deskriptif. Lebih lanjut, data perubahan konsentrasi CO terhadap waktu dari skenario normal dan simulasi kemacetan dikomparasikan serta dianalisis menggunakan regresi linier untuk menggambarkan kecenderungan (*trend*) laju akumulasi gas di dalam kabin selama 60 menit pengujian.

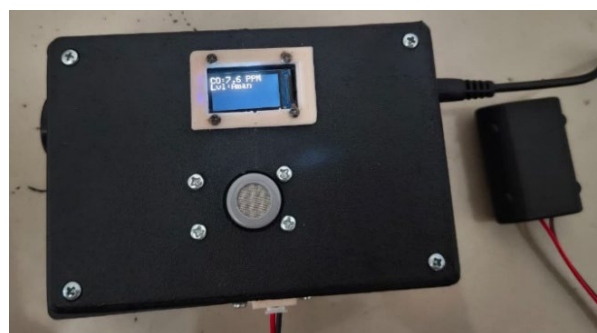
3 Hasil dan Diskusi

3.1 Hasil Perakitan Alat

Proses perakitan alat menyatukan beberapa komponen utama, yakni ESP32 sebagai mikrokontroler, sensor MQ-7 sebagai pendeteksi gas CO, modul ADS1115 sebagai pengubah sinyal analog ke digital, dan layar LCD IPS TFT sebagai penampil informasi. Seluruh komponen dirangkai sesuai dengan diagram sistem yang telah dirancang dan ditempatkan di dalam sebuah rumah perangkat untuk memudahkan pemasangan serta melindungi perangkat dari gangguan eksternal selama proses pengujian.



(a)



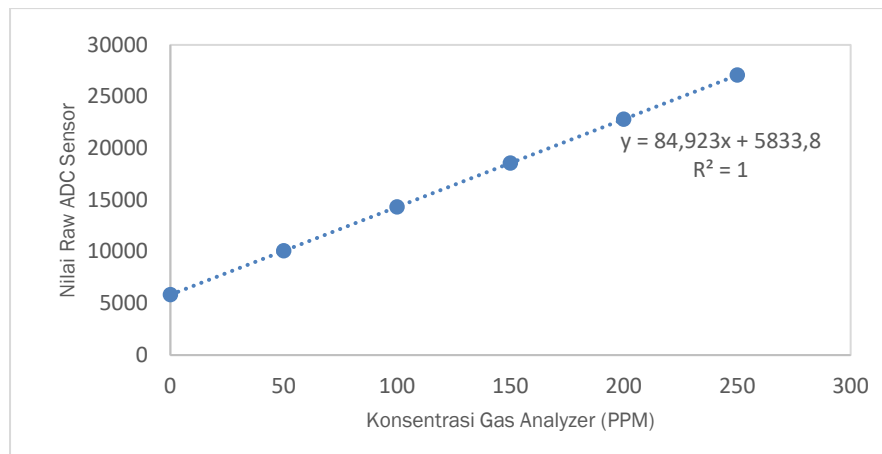
(b)

Gambar 7. Proses perakitan dan hasil realisasi sistem deteksi gas karbon monoksida (CO) berbasis ESP32:
(a) proses perakitan komponen elektronik pada rumah perangkat, (b) hasil akhir sistem deteksi gas CO berbasis ESP32

Gambar 7 menunjukkan hasil perakitan alat yang terdiri atas tampilan internal dan eksternal perangkat. Bagian internal memperlihatkan rangkaian komponen elektronik yang telah tersambung sesuai rancangan, sementara bagian eksternal menampilkan sensor MQ-7 dan layar LCD IPS TFT yang berfungsi menayangkan nilai konsentrasi CO secara *real-time*. Setelah perakitan, dilakukan pengujian fungsional untuk memastikan tiap komponen beroperasi dengan semestinya. Hasilnya menunjukkan sistem dapat membaca data dari sensor MQ-7, menampilkan hasil pembacaan pada layar, serta menjalankan fungsi peringatan sesuai program yang telah ditanamkan pada ESP32.

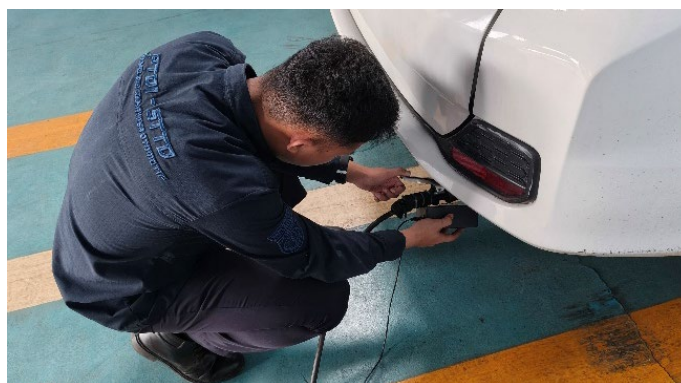
3.2 Analisis Kesesuaian Pembacaan Sensor MQ-7 terhadap *Gas Analyzer*

Sebelum instrumen divalidasi, sensor MQ-7 terlebih dahulu dikarakterisasi dengan memetakan respons nilai raw ADC terhadap berbagai variasi titik uji konsentrasi gas (0 hingga 250 ppm). Hasil pemetaan ini diekstraksi ke dalam bentuk grafik regresi linier untuk mendapatkan konstanta kalibrasi dasar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kurva kalibrasi sensor MQ-7

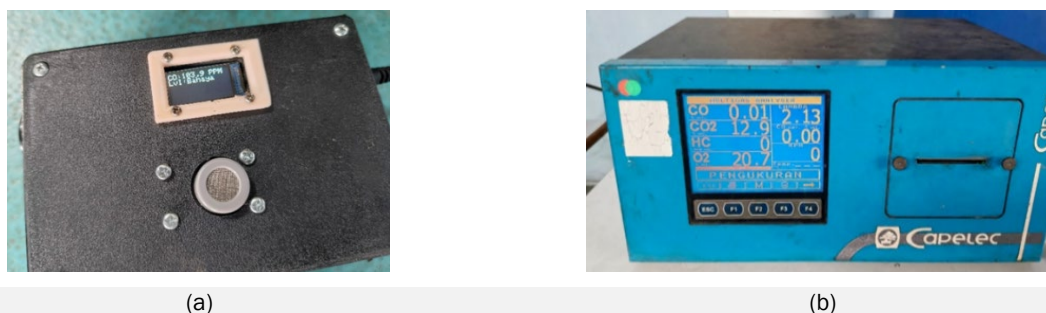
Hasil evaluasi komputasi terhadap persamaan regresi linier (konstanta *intercept* dan *slope*) menunjukkan tingkat presisi konversi yang sangat tinggi. Pada lima titik uji target (50, 100, 150, 200, dan 250 ppm), sistem mikrokontroler masing-masing menghasilkan pembacaan sebesar 49,99823; 99,99647; 149,9947; 199,9929; dan 250,0029 ppm. Kalkulasi matematis dari data tersebut mencatatkan rata-rata galat (*error*) komputasi yang sangat minimal, yakni hanya sebesar 0,00306%. Selisih deviasi yang sangat kecil ini membuktikan bahwa algoritma kalibrasi telah bekerja secara optimal dalam menerjemahkan sinyal mentah ADC menjadi representasi nilai konsentrasi gas (ppm) tanpa adanya distorsi komputasi yang berarti.



Gambar 9. Proses pemaparan gas karbon monoksida (CO) dari emisi kendaraan untuk analisis komparasi

Gambar 9 memperlihatkan proses pengambilan sampel emisi gas buang kendaraan secara langsung untuk keperluan pengujian kalibrasi sensor. Pada tahap ini, *gas analyzer* digunakan sebagai instrumen referensi karena kemampuannya dalam membaca kadar emisi gas buang kendaraan, termasuk karbon monoksida (CO), dalam satuan persentase volume (%vol). Di sisi lain, prototipe alat pendeteksi yang dirancang menampilkan hasil pembacaan sensor MQ-7 dalam satuan parts per million (ppm). Oleh karena itu, hasil pembacaan dari *gas analyzer* perlu dikonversi terlebih dahulu ke dalam satuan ppm agar komparasi data antara kedua instrumen dapat dilakukan secara langsung dan presisi.

Berdasarkan ketentuan konversi baku, nilai 1% volume setara dengan 10.000 ppm. Data pembacaan referensi tersebut kemudian dikonversi secara matematis untuk menyamakan satuan ukur dengan sensor MQ-7. Setelah nilai *gas analyzer* dikonversi ke dalam satuan ppm, tingkat presisi alat dievaluasi dengan menghitung persentase kesalahan (*error*) dan tingkat akurasi menggunakan parameter perhitungan yang telah diuraikan sebelumnya pada sub-bab Analisis Data.



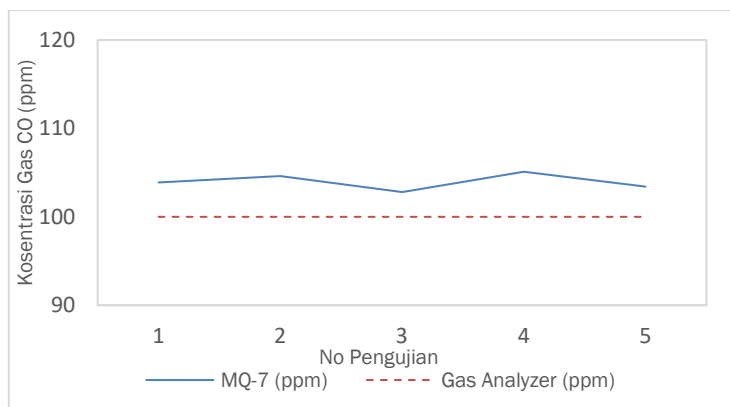
Gambar 10. Hasil pengukuran konsentrasi gas CO pada proses komparasi kalibrasi sensor: (a) hasil pengukuran alat deteksi gas CO, (b) hasil pengukuran *gas analyzer*

Gambar 10 menampilkan proses kalibrasi yang dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian pembacaan alat pendeteksi gas CO (a) terhadap alat referensi standar, yaitu *gas analyzer* (b). Pengujian ini dilakukan dengan mengekspos kedua alat secara bersamaan, lalu membandingkan nilai kadar CO yang terbaca oleh sensor MQ-7 dengan nilai pada *gas analyzer* guna menyempurnakan presisi algoritma pembacaan pada sistem.

Tabel 1. Hasil pengujian kalibrasi sensor MQ-7 terhadap instrumen *gas analyzer*

No	Kondisi gas	MQ-7 (ppm)	Gas analyzer (%vol)	Gas analyzer (ppm)	Error (%)
1.	<i>Idle</i>	103,9	0,01%	100	3,9%
2.	<i>Idle</i>	104,6	0,01%	100	4,6%
3.	<i>Idle</i>	102,8	0,01%	100	2,8%
4.	<i>Idle</i>	105,1	0,01%	100	5,1%
5.	<i>Idle</i>	103,4	0,01%	100	3,4%
Rata-rata					3,96%

Berdasarkan hasil tabel 1, pembacaan sensor MQ-7 pada kondisi *idle* menunjukkan nilai yang relatif stabil dan mendekati *gas analyzer*. *Gas analyzer* menunjukkan kadar CO sebesar 0,01% volume atau setara dengan 100 ppm pada setiap pengujian, sedangkan sensor MQ-7 menghasilkan pembacaan 103,9 ppm, 104,6 ppm, 102,8 ppm, 105,1 ppm, dan 103,4 ppm. Rata-rata pembacaan MQ-7 adalah 103,96 ppm dengan rata-rata *error* sebesar 3,96% dan memiliki tingkat akurasi sebesar 96,04%



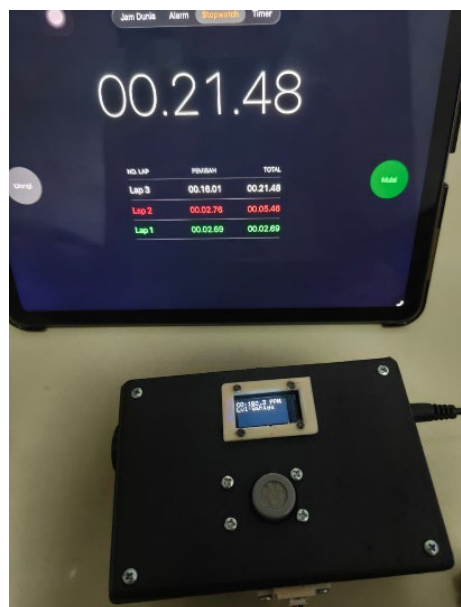
Gambar 11. Grafik trend pembacaan MQ-7 dan *gas analyzer*

Gambar 11 menyajikan grafik *trend* komparasi antara hasil pembacaan konsentrasi gas CO oleh sensor MQ-7 dan instrumen *gas analyzer* selama lima titik pengujian. Pada grafik, garis observasi berwarna merah merepresentasikan nilai referensi baku dari *gas analyzer* yang menunjukkan tingkat pembacaan stabil dan konstan pada angka 100 ppm secara terus-menerus.

Sementara itu, garis observasi berwarna biru merepresentasikan respons pendeteksian dari sensor MQ-7. Berdasarkan *trend* visualnya, garis biru menunjukkan pola fluktuasi yang sangat sempit dan berada tipis di atas garis referensi merah, bergerak pada rentang pembacaan terendah 102,8 ppm hingga menyentuh titik puncak pada 105,1 ppm. Pola grafik yang berjalan hampir sejajar dengan garis referensi ini memvisualisasikan bahwa selisih galat (*error*) pembacaan sangat kecil, yakni rata-rata hanya sebesar 3,96%. Secara visual, grafik ini menegaskan bahwa sensor MQ-7 memiliki tingkat presisi dan stabilitas yang sangat baik, karena kurva pembacaannya tidak menunjukkan lonjakan anomali yang ekstrem dan tetap konsisten mengikuti *trend* garis kestabilan instrumen standar. Tingkat akurasi sebesar 96,04% ini menunjukkan performa sistem yang sangat kompetitif. Penelitian terdahulu [20], metode karakterisasi serupa umumnya mendapati adanya margin *error* bawaan yang cukup fluktuatif pada sensor gas tipe semikonduktor komersial. Namun, pada penelitian ini, kelemahan tersebut berhasil diminimalkan melalui penerapan filter digital *Exponential Moving Average* (EMA) dikombinasikan dengan regresi linier inversi. Hasilnya, deviasi pembacaan mampu ditekan secara signifikan sehingga *error* rata-rata hanya mencapai 3,96%. Hal ini menegaskan bahwa sistem komputasi yang dibangun mampu menyempurnakan pembacaan perangkat keras, menjadikannya instrumen pemantauan kualitas udara kabin yang presisi dan andal.

3.3 Analisis Respons Sistem

Pengujian respons sistem dievaluasi berdasarkan pada lima titik uji yakni nilai target konsentrasi gas dalam satuan ppm yang sengaja dipaparkan pada sensor pada rentang 50, 100, 150, 200, dan 250 ppm. Guna meminimalkan risiko paparan gas CO murni, pengujian menyimulasikan lonjakan konsentrasi menggunakan stimulus gas hidrokarbon (butana/isobutana) dengan memanfaatkan karakteristik *cross-sensitivity* pada sensor MQ-7 [16]. Paparan gas diberikan secara terkontrol dan serentak dengan pengukuran waktu menggunakan *stopwatch* digital. Tiga parameter utama yang dievaluasi meliputi: waktu deteksi gas (durasi hingga nilai ppm muncul), waktu aktivasi notifikasi (durasi aktuator merespons ambang batas), dan *delay* pembacaan sistem. Data respons tersebut kemudian dianalisis menggunakan regresi linier guna mengidentifikasi tren kecepatan sistem terhadap fluktuasi konsentrasi gas.



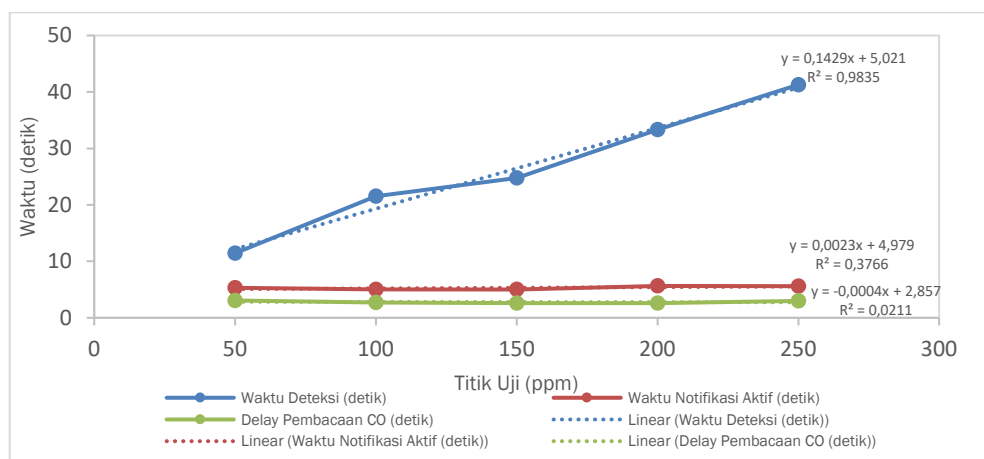
Gambar 12. Pengujian respons sistem menggunakan *stopwatch* digital

Pada Gambar 12 menunjukkan pengujian respons sistem yang menunjukkan kecepatan sistem dalam mendeteksi keberadaan gas CO dan memberikan peringatan kepada pengguna. Semakin cepat waktu respons yang dihasilkan, maka semakin efektif sistem dalam memberikan peringatan dini terhadap potensi paparan gas karbon monoksida di dalam kabin kendaraan. Tabel 2 menyajikan hasil pengujian respons sistem terhadap kelima titik uji paparan gas tersebut.

Tabel 2. Hasil pengujian respons sistem

Titik uji CO (ppm)	Waktu deteksi (detik)	Waktu notifikasi aktif (detik)	Delay pembacaan CO (detik)
50	11.44	5.31	3.07
100	21.51	5.05	2.69
150	24.78	5.01	2.60
200	33.30	5.64	2.60
250	41.28	5.58	3.01

Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa parameter waktu deteksi berbanding lurus dengan besarnya konsentrasi paparan gas. Semakin tinggi titik uji yang diberikan, durasi yang dibutuhkan sensor untuk melakukan pembacaan secara fisik juga semakin lama, yang ditandai dengan peningkatan waktu deteksi dari 11,44 detik pada titik uji 50 ppm menjadi 41,28 detik pada titik uji 250 ppm. Meskipun demikian, stabilitas perangkat lunak alat tetap terjaga dengan sangat baik. Hal ini dibuktikan oleh parameter waktu aktivasi notifikasi yang berjalan stabil di kisaran 5 detik dan *delay* pembacaan CO yang konstan di rentang 2,6 hingga 3 detik, tanpa terpengaruh oleh fluktuasi maupun tingginya konsentrasi gas yang diberikan. Gambar 13 menyajikan grafik hubungan antara titik uji konsentrasi gas karbon monoksida (CO) dengan waktu deteksi sistem, waktu aktivasi notifikasi, dan *delay* pembacaan sensor, yang dianalisis menggunakan metode regresi linier sederhana.



Gambar 13. Grafik pengujian respons sistem

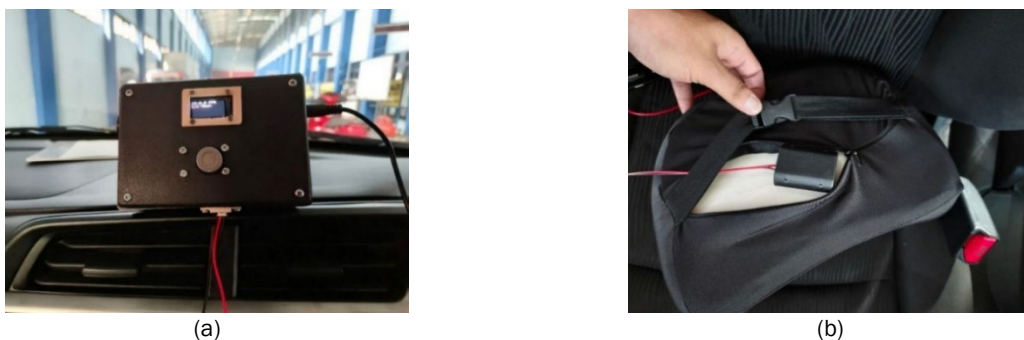
Berdasarkan Gambar 13, waktu deteksi mengalami peningkatan proporsional seiring dengan bertambahnya konsentrasi gas CO, yakni dari 11,44 detik pada titik uji 50 ppm hingga mencapai 41,28 detik pada 250 ppm. Sebaliknya, waktu aktivasi notifikasi dan *delay* pembacaan sensor menunjukkan hasil yang relatif stabil dan konstan pada seluruh titik uji, masing-masing berada pada kisaran 5,01–5,64 detik dan 2,60–3,07 detik, tanpa terpengaruh oleh fluktuasi konsentrasi gas. Hasil analisis regresi linier terhadap waktu deteksi menghasilkan persamaan $y = 0,1429x + 5,021$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9832$. Nilai R^2 yang mendekati satu ini mengindikasikan adanya hubungan linier yang sangat kuat, di mana sekitar 98,35% variasi waktu deteksi dipengaruhi oleh peningkatan konsentrasi gas CO, sementara sisanya dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti siklus pemanasan (*heating cycle*) sensor. Sebaliknya, persamaan regresi pada waktu aktivasi notifikasi ($y = 0,00226x + 4,979$; $R^2 = 0,3766$) dan *delay* pembacaan ($y = -0,00043x + 2,857$; $R^2 = 0,0211$) memiliki nilai *slope* mendekati nol dan R^2 yang rendah. Hal ini membuktikan secara statistik bahwa perubahan konsentrasi CO tidak memengaruhi kecepatan aktivasi notifikasi maupun proses akuisisi data. Secara keseluruhan, sistem terbukti memiliki performa deteksi yang responsif serta stabilitas operasional yang andal dalam menyampaikan peringatan dini kepada pengguna.

Berdasarkan hasil analisis respons sistem, menurut Galvani et al. [21], waktu deteksi, MQ-7 yang rata-rata mencapai 26,46 detik ini mencatatkan respons yang relatif lebih lambat dibandingkan teknologi sensor gas tingkat lanjut. Tinjauan literatur menunjukkan bahwa sensor bermaterial khusus, seperti nanostruktur $\text{TiO}_2\text{-CeO}_2$, mampu mencapai waktu respons instan di kisaran 2 detik. Jeda waktu deteksi pada MQ-7 ini merupakan karakteristik fisik bawaan dari sensor gas semikonduktor oksida logam (MOS) komersial yang membutuhkan waktu siklus pemanasan (*heating cycle*) untuk mencapai saturasi pada permukaan material sensitifnya. Kendati memiliki keterbatasan respons fisik, kelemahan tersebut berhasil dikompensasi secara

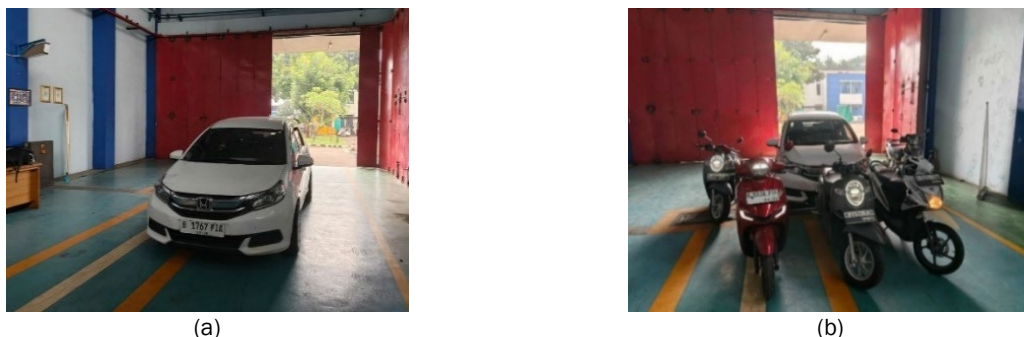
efektif oleh arsitektur perangkat lunak yang dirancang. Hal ini dibuktikan oleh waktu aktuasi notifikasi (rata-rata 5,32 detik) dan *delay* pembacaan komputasi (rata-rata 2,79 detik) yang berjalan sangat cepat dan konstan. Kinerja operasional sistem ini sejalan dan mengonfirmasi studi sebelumnya [17], [18] yang menyimpulkan bahwa mikrokontroler ESP32 memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi untuk memproses dan mengeksekusi aktuasi perangkat keselamatan berbasis *real-time*.

3.4 Implementasi Alat dan Pengujian Kinerja Sistem

Implementasi alat dilakukan dengan memasang perangkat pendeteksi gas karbon monoksida (CO) di dalam kabin kendaraan MPV. Unit utama alat ditempatkan pada bagian *dashboard* kendaraan agar sensor MQ-7 dapat mendeteksi konsentrasi gas CO di dalam kabin secara optimal. Sementara itu, modul vibrator dipasang pada sandaran kepala (*headrest*) kursi pengemudi menggunakan tali pengikat sehingga getaran yang dihasilkan dapat dirasakan secara langsung oleh pengguna saat sistem mendeteksi peningkatan konsentrasi CO (Gambar 14). Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh, mulai dari proses deteksi gas, pengolahan data, hingga aktivasi notifikasi audio, visual, dan haptik. Pengujian ini dilakukan di laboratorium Pengujian Unit Kendaraan Bermotor Politeknik Transportasi Darat Indonesia – STTD (Gambar 15). Pengujian kinerja sistem dan *setting up* alat dilakukan selama dua minggu.



Gambar 14. Implementasi alat pada kendaraan: (a) setting up unit pada dashboard kendaraan, (b) motor vibrator pada headrest kursi pengemudi



Gambar 15. Pengujian kinerja sistem: (a) pengujian skenario 1, (b) pengujian skenario 2

Pengujian skenario 1 menggunakan satu unit kendaraan yang bertujuan untuk mendeteksi kemungkinan kebocoran gas CO yang berasal dari kendaraan itu sendiri. Sedangkan pada skenario 2, dilakukan dengan menggunakan satu unit mobil dengan dikelilingi lima unit motor. Hal ini dilakukan untuk mendesain kondisi yang mendekati kondisi eksisting di lapangan, di mana ada kemungkinan kebocoran gas CO dari kendaraan itu sendiri maupun kendaraan di sekitarnya. Pengujian kinerja sistem dilakukan selama 60 menit dengan interval pengamatan setiap 10 menit menggunakan dua skenario pengujian. Skenario pertama dilakukan pada kondisi normal tanpa adanya simulasi kemacetan, sedangkan skenario kedua dilakukan pada kondisi yang merepresentasikan kemacetan dengan adanya sumber emisi kendaraan di sekitar area pengujian. Parameter yang diamati meliputi kadar gas CO yang terbaca melalui sensor MQ-7, status sistem yang ditampilkan pada LCD, serta kondisi *buzzer* dan vibrator sebagai media notifikasi.

3.4.1 Hasil Pengujian Kinerja Sistem pada Kondisi Normal

Pengujian kinerja sistem pada kondisi normal dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan alat dalam memantau konsentrasi gas karbon monoksida (CO) di dalam kabin kendaraan tanpa adanya paparan emisi kendaraan yang signifikan. Pengujian dilaksanakan selama 60 menit dengan interval pengamatan setiap 10

menit. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi gas CO yang terbaca oleh sensor MQ-7, status sistem yang ditampilkan pada LCD, serta respons aktuator berupa *buzzer* dan motor vibrator. Hasil pengujian pada kondisi normal ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian kinerja sistem pada kondisi normal

No	Waktu (menit)	MQ- 7 (ppm)	Status sistem LCD	<i>Buzzer</i> (on/off)	Vibrator (on/off)
1	10	0	Aman	off	off
2	20	0,7	Aman	off	off
3	30	1,4	Aman	off	off
4	40	2,8	Aman	off	off
5	50	4,5	Aman	off	off
6	60	9,9	Waspada	on	on

Pada pengujian kondisi normal, konsentrasi CO meningkat secara bertahap dan bertahan pada status aman tanpa notifikasi hingga menit ke-50. Puncak konsentrasi tercatat pada menit ke-60 sebesar 9,9 ppm, yang secara responsif memicu sistem mengubah status menjadi Waspada dan mengaktifkan peringatan otomatis (*buzzer* dan vibrator). Hasil ini mengonfirmasi keandalan sistem dalam memantau udara kabin secara *real-time* dan mengeksekusi peringatan secara presisi tepat saat ambang batas terlewati.

3.4.2 Hasil Pengujian Kinerja Sistem pada Kondisi Simulasi Kemacetan

Pengujian terhadap kinerja sistem pada kondisi simulasi kemacetan bertujuan untuk mengetahui respons sistem terhadap peningkatan konsentrasi gas karbon monoksida (CO) dalam kondisi yang merepresentasikan kendaraan berada di tengah kepadatan lalu lintas. Proses pengujian dilakukan selama 60 menit dengan interval pengambilan data setiap 10 menit menggunakan prosedur yang sama seperti pada kondisi normal. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi gas CO, status sistem pada LCD, serta aktivasi *buzzer* dan motor vibrator sebagai media peringatan. Hasil pengujian pada kondisi simulasi kemacetan ditunjukkan pada Tabel 4.

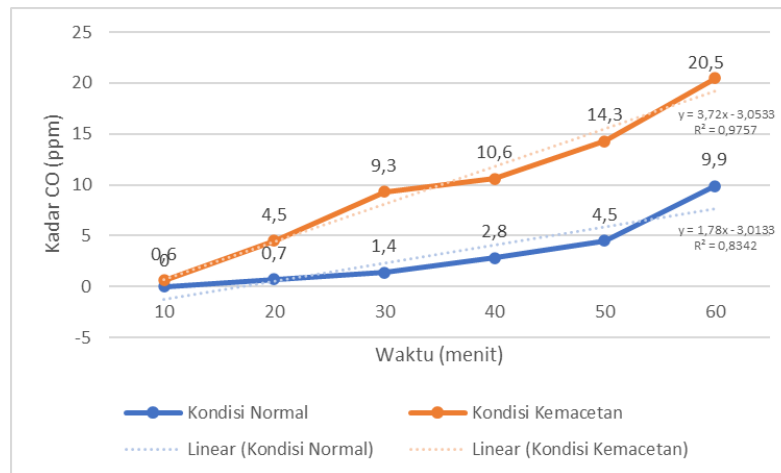
Tabel 4. Hasil pengujian kinerja sistem pada kondisi simulasi kemacetan

No	Waktu (menit)	MQ- 7 (ppm)	Status Sistem LCD	<i>Buzzer</i> (on/off)	Vibrator (on/off)
1	10	0,6	Aman	off	off
2	20	4,5	Aman	off	off
3	30	9,3	Aman	off	off
4	40	10,6	Waspada	on	on
5	50	14,3	Waspada	on	on
6	60	20,5	Waspada	on	on

Berdasarkan Tabel 4, Uji coba kondisi simulasi kemacetan menunjukkan peningkatan konsentrasi CO yang lebih cepat dibandingkan kondisi normal, mencapai puncaknya pada 20,5 ppm di menit ke-60. Respons sistem berhasil terverifikasi dengan aktivasi status Waspada serta pemicuan *buzzer* dan vibrator lebih awal, yaitu pada menit ke-40 saat kadar CO menyentuh 10,6 ppm. Temuan ini membuktikan dampak signifikan emisi kendaraan sekitar terhadap kualitas udara kabin dan kemampuan sistem memberikan peringatan dini secara otomatis sebelum mencapai tingkat berbahaya.

3.4.3 Analisis Hasil Pengujian Kinerja Sistem

Dari keseluruhan hasil pengujian, sistem terbukti mampu menjalankan seluruh fungsi rancangannya, mulai dari mendeteksi gas CO, mengolah data, menentukan status kondisi, hingga mengaktifkan notifikasi audio, visual, dan haptik. Baik pada skenario normal maupun simulasi kemacetan, sensor MQ-7 berhasil menangkap perubahan konsentrasi CO dan menampilkannya secara *real-time* melalui LCD.



Gambar 16. Grafik perbandingan kondisi uji

Gambar 16 menunjukkan perbandingan perubahan kadar gas karbon monoksida (CO) pada kondisi normal dan simulasi kemacetan selama 60 menit pengujian. Pada kedua kondisi, konsentrasi CO meningkat seiring bertambahnya waktu, namun laju peningkatan pada simulasi kemacetan lebih tinggi. Pada akhir pengujian, kadar CO pada kondisi normal mencapai 9,9 ppm, sedangkan pada simulasi kemacetan mencapai 20,5 ppm. Kondisi ini menunjukkan bahwa simulasi kemacetan menyebabkan akumulasi CO di dalam kabin kendaraan lebih besar dibandingkan kondisi normal. Dampaknya, sistem memberikan peringatan lebih awal pada simulasi kemacetan, yaitu saat menit ke-40 (10,6 ppm), sedangkan pada kondisi normal peringatan baru muncul pada menit ke-60 (9,9 ppm).

Analisis regresi linear menunjukkan bahwa hubungan antara waktu pengujian dan kadar CO bersifat positif pada kedua kondisi. Pada kondisi normal diperoleh persamaan regresi $y = 1,78x - 3,0133$ dengan nilai (R^2) sebesar 0,8342, sedangkan pada simulasi kemacetan diperoleh persamaan $y = 3,72x - 3,0533$ dengan nilai R^2 sebesar 0,9757. Nilai gradien yang lebih besar pada simulasi kemacetan menunjukkan laju peningkatan konsentrasi CO yang lebih cepat, sementara nilai R^2 yang lebih tinggi menunjukkan model regresi memiliki kesesuaian yang lebih baik terhadap data. Hasil ini memperkuat bahwa simulasi kemacetan menghasilkan peningkatan konsentrasi CO yang lebih konsisten sehingga sistem mampu memberikan peringatan lebih dini.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan, sistem deteksi gas karbon monoksida (CO) berbasis mikrokontroler ESP32 dan sensor MQ-7 yang dirancang terbukti mampu mengenali perubahan konsentrasi gas secara *real-time* serta menampilkan informasi kualitas udara melalui LCD IPS TFT. Pada tahap pengujian kalibrasi, sensor MQ-7 yang dikombinasikan dengan filter digital Exponential Moving Average (EMA) dan regresi linier inversi menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan rata-rata galat (*error*) pengujian terhadap instrumen standar gas analyzer sebesar 3,96% atau setara dengan tingkat akurasi 96,04%.

Pada pengujian respons sistem, alat terbukti mampu mendeteksi kenaikan konsentrasi CO pada rentang 50–250 ppm dengan rata-rata waktu deteksi sebesar 26,46 detik, waktu aktivasi notifikasi sebesar 5,32 detik, dan *delay* pembacaan sebesar 2,79 detik. Analisis regresi linier menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara peningkatan konsentrasi gas dan waktu deteksi ($R^2 = 0,9835$), sementara waktu aktivasi notifikasi dan *delay* pembacaan berjalan stabil tanpa terpengaruh signifikan oleh perubahan konsentrasi.

Pada pengujian kinerja di dalam kabin kendaraan, konsentrasi CO pada kondisi normal meningkat dari 0,0 ppm menjadi 9,9 ppm dalam 60 menit dan memicu status waspada pada akhir pengujian, sedangkan pada simulasi kemacetan konsentrasi CO meningkat lebih cepat hingga mencapai 20,5 ppm dan memicu status waspada sejak menit ke-40 ($R^2 = 0,9757$). Temuan ini mengindikasikan bahwa akumulasi CO pada kondisi kemacetan berlangsung lebih konsisten dan sistem mampu memberikan peringatan lebih dini pada situasi dengan tingkat risiko yang lebih tinggi.

Penerapan sistem peringatan berlapis melalui perpaduan *buzzer* dan motor *vibrator* pada *headrest* dapat menjadi inovasi dalam pengembangan alat peringatan yang dapat mencegah dan mengurangi keracunan gas CO pada pengemudi dan penumpang melalui penyampaian informasi bahaya secara haptik.

Penelitian ini belum melakukan pengujian empiris secara langsung untuk membuktikan apakah penambahan notifikasi getar tersebut benar-benar meningkatkan efektivitas alat secara keseluruhan pada subjek pengemudi. Oleh karena itu, evaluasi performa keterlibatan pengguna (*user-response testing*) secara langsung menjadi rekomendasi mutlak untuk penelitian lanjutan. Keandalan alat di masa mendatang juga dapat disempurnakan dengan menggunakan material sensor yang memiliki waktu respons lebih instan guna meminimalisasi jeda *heating cycle*.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknologi Rekayasa Otomotif, Politeknik Transportasi Darat Indonesia (PTDI-STTD) atas dukungan serta penyediaan fasilitas laboratorium dan sarana penelitian yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini hingga selesai.

Referensi

- [1] P. T. B. S. Branco, A. J. S. Pinto, and S. I. V. Sousa, "Characterising indoor air quality in private vehicle cabins under unprecedented traffic conditions during COVID-19 lockdown," *Build. Environ.*, vol. 262, p. 111797, Aug. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111797>
- [2] D. Wei, F. Nielsen, H. Karlsson, L. Ekberg, and J. O. Dalenbäck, "Vehicle cabin air quality: influence of air recirculation on energy use, particles, and CO₂," *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 30, no. 15, pp. 43387–43402, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25219-x>
- [3] T. J. Teleszewski, K. Gładyszewska-Fiedoruk, and J. Kropiewnicki, "Analysis of carbon monoxide concentration in a single-car garage depending on the method of parking the car - case study," *Results in Engineering*, vol. 31, p. 111388, Sep. 2026. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111388>
- [4] B. Xu, X. Chen, and J. Xiong, "Air quality inside motor vehicles' cabins: A review," *Indoor and Built Environment*, vol. 27, no. 4, pp. 452–465, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1177/1420326X16679217>
- [5] R. J. Zhao et al., "Bicycle lanes to improve road user safety and urban air quality," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 771, no. 1, p. 012032, May 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/771/1/012032>
- [6] A. Nugroho, J. Wirayudatama, D. Mugisidi, and A. Fikri, "Analisa Dampak Emisi Gas Buang Pada Kualitas Udara," *METALIK: Jurnal Manufaktur, Energi, Material Teknik*, vol. 4, no. 2, pp. 94–97, Sep. 2025. <https://doi.org/10.22236/metalik.v4i2.20766>
- [7] G. Savioli et al., "Carbon Monoxide Poisoning: From Occupational Health to Emergency Medicine," *J. Clin. Med.*, vol. 13, no. 9, p. 2466, May 2024. <https://doi.org/10.3390/jcm13092466>
- [8] H. Kinoshita et al., "Carbon monoxide poisoning," *Toxicol. Rep.*, vol. 7, p. 169, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.01.005>
- [9] N. Sari, S. W. Praja, and B. Hidayat, "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Level of gas emissions of passenger car on climb road segment Level of gas emissions of passenger car on climb road segment," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 179, p. 12028, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/179/1/012028>
- [10] B. E. Hyson, B. M. Friedman, B. Spear, and S. C. Bishop-Freeman, "Lethal carbon monoxide generated from small internal combustion engines," *J. Anal. Toxicol.*, vol. 48, no. 8, pp. 625–629, Oct. 2024. <https://doi.org/10.1093/jat/bkae049>
- [11] G. Ramponi et al., "The diagnostic accuracy of carbon monoxide pulse oximetry in adults with suspected acute carbon monoxide poisoning: a systematic review and meta-analysis," *Front. Med. (Lausanne)*, vol. 10, p. 1250845, Dec. 2023. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1250845>
- [12] M. Afzal et al., "Carbon Monoxide Poisoning: Diagnosis, Prognostic Factors, Treatment Strategies, and Future Perspectives," *Diagnostics* 2025, Vol. 15, Page 581, vol. 15, no. 5, p. 581, Feb. 2025. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15050581>
- [13] T. Oshima, A. Sasao, H. Sekijima, and H. Kotani, "A case of carbon monoxide poisoning before a vehicle fire: Availability of volatile hydrocarbons analysis," *Leg. Med.*, vol. 60, p. 102174, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2022.102174>
- [14] C. Zaba, P. Świdorski, K. Sommerfeld-Klatta, Z. Zaba, K. Pluta-Hadas, and M. Urbaniak, "Suicidal Carbon Monoxide Poisoning Using Motor Vehicle Exhaust in an Open Space," *Medical Principles and Practice*, vol. 28, no. 5, pp. 490–492, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1159/000500009>
- [15] W. H. Organization, "WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide," *Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, pp. 1–360, Sep. 2021, Accessed: Sep. 02, 2026. [Online]. Available: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>

- [16] "MQ-7B Carbon Monoxide Sensor–Winsen." . [Online]. Available: <https://www.winsen-sensor.com/sensors/co-sensor/mq-7b.html>. [Accessed: Sep. 05, 2026]
- [17] D. Kurniawan, S. R. Sulistiyanti, and U. Murdika, "sistem pemantau gas karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO2) menggunakan sensor MQ7 dan MQ-135 terintegrasi Telegram," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 11, no. 2, Apr. 2023. <https://doi.org/10.23960/jitet.v11i2.2963>
- [18] L. M. Easterline, A. A. Z. R. Putri, P. S. Atmaja, A. L. Dewi, and A. Prasetyo, "Smart air monitoring with IoT-based MQ-2, MQ-7, MQ-8, and MQ-135 sensors using NodeMCU ESP32," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 245, pp. 815–824, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.10.308>
- [19] F. Fachri Nurmay Rohmah Dinnul Haq and K. D. I. Kurniawan Dwi Irianto, "Indoor air quality system : A design of monitoring CO and CO2 substances for elderly home using IoT," *The Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 13, no. 5, Oct. 2024. <https://doi.org/10.33022/ijcs.v13i5.4408>
- [20] H. Suhendar, W. Indrasari, S. G. Muqita, and I. G. A. Isnaini, "Development of a real-time gas concentration measurement system using Internet of Things-based monitoring," *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 9, no. 1, pp. 27–38, Apr. 2024. <https://doi.org/10.21009/SPEKTRA.091.03>
- [21] M. Galvani, S. Freddi, and L. Sangaletti, "Disclosing fast detection opportunities with nanostructured chemiresistor gas sensors based on metal oxides, carbon, and transition metal dichalcogenides," *Sensors (Basel)*, vol. 24, no. 2, p. 0, Jan. 2024. <https://doi.org/10.3390/s24020584>
- [22] S. P. Trisnanti, M. Yantidewi, and U. A. Deta, "Carbon monoxide (CO) level measurement using Internet of Things (IoT) based drone with NodeMCU ESP32," *Protek : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 11, no. 3, pp. 214–219, Sep. 2024. <https://doi.org/10.33387/protk.v11i3.6237>
- [23] M. Sreerama Murty, S. Rao Dhanikonda, P. Sowjanya, P. Jagdish Kumar, N. S. Chandra, and C. Dastagiraiah, "Smart gas leakage detector using IoT sensors," *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 2613–2620, Aug. 2024. <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/6688>
- [24] S. I. Noubissie Tientcheu, S. Du, and K. Djouani, "Review on haptic assistive driving systems based on drivers' steering-wheel operating behaviour," *Electronics 2022*, Vol. 11, Page 2102, vol. 11, no. 13, p. 2102, Jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/electronics11132102>