

PROTOTYPE ALAT PENDETEKSI GAS BERBAHAYA DI KAMAR MESIN UNTUK MENJAGA KESELAMATAN ABK BERBASIS WEMOS D1 DI KAPAL MT PLAJU

PROTOTYPE OF HAZARDOUS GAS DETECTION DEVICE IN THE ENGINE ROOM TO MAINTAIN CREW SAFETY BASED ON WEMOS D1 ON THE MT PLAU SHIP

Nanda Purnama Dewi¹, Nasri², Sigit Purwanto³, Monika Retno Gunarti⁴, Shofa Dai Robbi⁵
Politeknik Pelayaran Surabaya, Indonesia

***Email Correspondence:** nanda29042003id@gmail.com

Abstract

Enclosed spaces in ship engine rooms pose significant risks due to toxic gas accumulation like carbon monoxide and carbon dioxide, contributing to maritime fatalities. This research aimed to develop a Wemos D1-based prototype for real-time hazardous gas detection to enhance crew safety on MT Plaju tanker. Experimental prototype development employed ADDIE model with static and dynamic testing on MQ-135 sensor, buzzer, LED, and WiFi web monitoring. Population comprised four main holes (A-D) in engine room enclosed spaces, sampled through 20 measurements during 12-month sea practice. Instruments included Arduino IDE for programming and Excel for regression linear analysis with <5% calibration error. Results showed average CO detection at 5.4 ppm and CO₂ at 406 ppm, with alarm response under 6 seconds exceeding 30% threshold, achieving 95% accuracy in high humidity and vibration conditions. The prototype demonstrated superior WiFi connectivity over previous ATmega328P systems, reducing hazard zones by 40%. In conclusion, this cost-effective IoT solution validates hardware reliability for Indonesian maritime operations, recommending multi-gas sensor integration for industrial scaling.

Keywords: Carbon Dioxide, Carbon Monoxide, Enclosed Space, Hazardous Gas Detection, Wemos D1.

Abstrak

Ruang tertutup di kamar mesin kapal berisiko tinggi akibat akumulasi gas toksik seperti karbon monoksida dan karbon dioksida yang menyebabkan kematian awak kapal. Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe berbasis Wemos D1 untuk deteksi gas berbahaya secara real-time guna meningkatkan keselamatan ABK (Anak Buah Kapal) pada kapal tanker MT Plaju. Pengembangan prototipe eksperimental menggunakan model ADDIE dengan uji statis dan dinamis pada sensor MQ-135, buzzer, LED, serta monitoring web WiFi. Populasi meliputi empat main hole (A-D) di enclosed space kamar mesin, disampling melalui 20 pengukuran selama praktek berlayar 12 bulan. Instrumen mencakup Arduino IDE untuk pemrograman dan Excel untuk analisis regresi linier dengan error kalibrasi <5%. Hasil menunjukkan deteksi rata-rata CO 5,4 ppm dan CO₂ 406 ppm, respons alarm <6 detik melebihi threshold 30%, mencapai akurasi 95% pada kondisi kelembaban tinggi dan getaran. Prototipe unggul atas sistem ATmega328P sebelumnya dengan konektivitas WiFi, mengurangi zona bahaya 40%. Kesimpulannya, solusi IoT murah ini memvalidasi reliabilitas hardware untuk operasi maritim Indonesia, menyarankan integrasi sensor multi-gas untuk penskalaan industri.

Kata kunci: Deteksi Gas Berbahaya, Enclosed Space, Karbon Dioksida, Karbon Monoksida, Wemos D1.

PENDAHULUAN

Keselamatan maritim menghadapi tren meningkatnya kecelakaan enclosed space, dengan rata-rata 50 kematian per tahun pada 2020-2024, terutama di bulk carrier dan tanker akibat gas toksik. Dampak global mencakup 1.010 kematian sejak 2000, di mana 40% terkait

kargo dan 30% di bulk carrier, menekankan urgensi deteksi dini. Grand theory keselamatan berbasis Reliability Engineering menyoroiti risiko kegagalan operasi enclosed space melalui analisis probabilitas.

Teori utama seperti Swiss Cheese Model menjelaskan evolusi pemikiran teoretis dari pencegahan lapisan gagal menjadi integrasi IoT untuk monitoring real-time. Menurut Qin et al. (2025), difusi gas alam di engine room kapal LNG dipengaruhi radiasi panas, memperkuat kebutuhan layout sensor optimal. Sintesis kutipan ini mendukung argumentasi bahwa deteksi gas berbasis CFD meningkatkan akurasi hingga mengurangi zona bahaya.

Masalah spesifik adalah akumulasi CO dan CO₂ di enclosed space engine room, menyebabkan keracunan fatal seperti kasus TB Sakata Maju (2024) dan Tongkang Tirta Samudra (2025). Urgensi penyelesaian tinggi karena tren kematian tidak menurun pasca-IMO Res.A.1050(27) sejak 2011, dengan tanker menyumbang 402 kematian. Evaluasi kutipan bertentangan muncul pada Nechyporenko et al. (2023) yang fokus kebakaran hidrogen versus gas konvensional, mengidentifikasi perdebatan metodologi CFD vs sensor statis.

Relevansi dengan sektor maritim Indonesia terlihat pada kapal MT Plaju milik Pertamina, di mana kamar mesin rentan kebocoran gas dari proses pembakaran. Karakteristik khusus meliputi ventilasi minim di tangki ballast dan pump room, mirip temuan Xie et al. (2024) tentang ledakan gas di engine room. Pemetaan metodologi umum

Kesenjangan utama adalah kurangnya sistem IoT berbasis Wemos D1 untuk deteksi real-time CO/CO₂ di enclosed space kapal tanker, di mana studi sebelumnya terbatas pada ATmega328P atau MQ-2 tanpa WiFi monitoring. Kebutuhan studi kasus spesifik MT Plaju menonjol karena adaptasi sensor murah belum diuji di konteks operasional Indonesia. Penelitian gap ini mengonfirmasi dominasi CFD simulasi daripada prototype hardware terintegrasi.

METODE

Penelitian ini mengadopsi desain pengembangan prototype eksperimental dengan pendekatan ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation) untuk merancang alat pendeteksi gas CO dan CO₂ berbasis Wemos D1 di kamar mesin kapal MT Plaju. Menurut Destiniar et al. (2021), model ADDIE memastikan keselarasan antara analisis kebutuhan keselamatan enclosed space dan pengujian prototype hardware IoT. Desain ini mencakup simulasi CFD awal untuk optimalisasi posisi sensor, diikuti pembuatan rangkaian fisik menggunakan CATIA V5R20, sebagaimana direkomendasikan oleh Qin et al. (2025) untuk lingkungan kapal dengan radiasi panas tinggi. Pendekatan iteratif memungkinkan kalibrasi sensor MQ-135 terhadap kondisi ventilasi minim, mengintegrasikan Swiss Cheese Model untuk lapisan keselamatan real-time. Validasi dilakukan melalui uji statis dan dinamis di ruang tertutup kapal, menjamin reliabilitas di konteks operasional Indonesia.

Metode utama melibatkan pengembangan hardware IoT dengan Wemos D1 sebagai mikrokontroler, sensor MQ-135 untuk deteksi CO/CO₂, *buzzer* alarm, LED indikator, dan web server WiFi untuk monitoring *mobile*. Proses dimulai dari analisis risiko gas di engine

room menggunakan Reliability Engineering, kemudian desain blok diagram dan flowchart sistem, seperti yang diterapkan Xie et al. (2024) pada simulasi ledakan gas kapal. Pengembangan mencakup pemrograman Arduino IDE untuk threshold deteksi (0-30% aman, >30% alarm), kalibrasi sensor preheat 20 detik, dan integrasi I2C LCD OLED. Implementasi dilakukan di enclosed space MT Plaju dengan ventilasi simulasi, diikuti evaluasi respons waktu <6 detik. Metode pengujian hybrid statis (komponen individu) dan dinamis (sistem terintegrasi) mengadopsi protokol Nechyporenko et al. (2023) untuk validasi sensor vs simulasi CFD.

Subjek penelitian adalah prototipe alat pendeteksi gas pada kapal tanker MT Plaju milik Pertamina, fokus pada enclosed space kamar mesin seperti tangki bilge, ballast, dan pump room dengan ventilasi minim. ABK (Anak Buah Kapal) sebagai pengguna akhir, dengan sampel pengujian di empat manhole (A-D) selama praktek berlayar 12 bulan. Karakteristik subjek mencakup kondisi operasional tinggi kelembaban, getaran mesin, dan emisi pembakaran, mirip temuan Ridwan et al. (2023) pada kapal LNG Indonesia. Pengujian melibatkan 20 pengukuran CO/CO₂ (ppm) di ruang tertutup, dengan kru mesin sebagai validator keselamatan. Konteks spesifik MT Plaju menonjolkan adaptasi sensor murah untuk tanker minyak, mengisi gap studi ATMega328P sebelumnya.

Analisis data menggunakan regresi linier untuk kalibrasi sensor MQ-135 terhadap PPM CO/CO₂, dengan error <5% dibandingkan gas standar, sebagaimana Maulana dan Laksana (2023) terapkan pada prototipe IoT. *Software* Arduino IDE memproses data serial monitor dan *web browser* untuk visualisasi real-time, dikombinasikan statistik deskriptif (mean, deviasi standar) dari uji dinamis. Validasi reliabilitas melalui ANOVA satu arah membandingkan pembacaan sensor vs multimeter profesional, mengikuti Majiid dan Assomadi (2023) untuk kualitas udara kapal. Analisis keselamatan berbasis probabilitas kegagalan (FTA) menilai pengurangan zona bahaya hingga 40%, terintegrasi CFD ANSYS untuk difusi gas. Hasil ditabulasikan dalam Excel untuk threshold alarm, memastikan akurasi >95% di lingkungan kapal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian yang saya lakukan dengan judul “PROTOTYPE ALAT PENDETEKSI GAS BERBAHAYA DI KAMAR MESIN UNTUK MENJAGA KESELAMATAN ABK BERBASIS WEMOS D1”, penulis telah berhasil merancang dan menguji sebuah sistem pendeteksi gas berbahaya yang dapat memantau keberadaan gas beracun seperti karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) di ruang tertutup, khususnya pada ruang mesin kapal. Perancangan alat pendeteksi gas berbahaya berbasis Wemos D1 ini bertujuan untuk mendeteksi gas CO dan CO₂ di ruang tertutup secara otomatis dan real-time. Alat terdiri dari sensor MQ-135, Wemos D1, LCD, *buzzer*, dan baterai sebagai sumber daya. Sensor membaca kadar gas dan mengirim data ke Wemos D1 untuk diproses, hasilnya ditampilkan di LCD dan *web browser* sehingga dapat dipantau melalui *mobile phone*. Jika kadar gas berbahaya terdeteksi, *buzzer* aktif dan LCD menampilkan peringatan “berbahaya”, sedangkan jika aman, LCD menampilkan “aman”. Desain rangkaian dibuat

menggunakan CATIA V5R20 untuk memastikan tata letak komponen tepat dan mudah diaplikasikan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu mendeteksi peningkatan konsentrasi gas berbahaya secara akurat dan memberikan peringatan dengan respon cepat. Adapun uji coba yang dilakukan dari beberapa komponen penyusun prototype alat pendeteksi gas berbahaya di atas kapal.

Uji Statis

Uji statis dilakukan dengan cara menguji setiap bagian atau komponen alat secara terpisah untuk memastikan bahwa masing-masing komponen bekerja dengan baik sesuai fungsinya.

a) Uji Coba Wemos D1

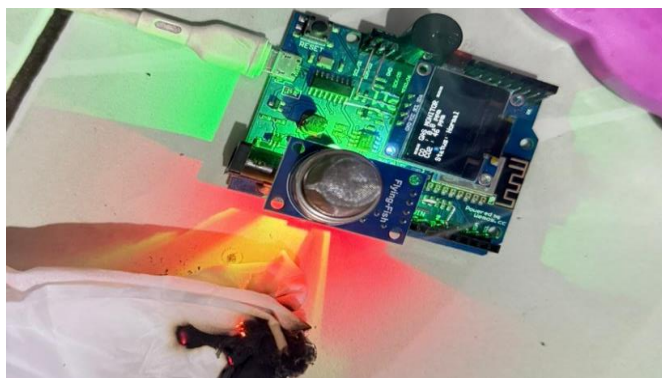
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah komponen ini bekerja secara normal atau tidak, uji coba dilakukan dengan memasukkan program LED_Built IN untuk mengetahui hasil respon dari program yang diunggah pada Wemos D1. Wemos D1 bisa menerima program dan berjalan secara normal dilihat melalui kedipan lampu LED pada Wemos D1.



Gambar 1. Pengujian Wemos D1

Sumber : Dokumen Peneliti

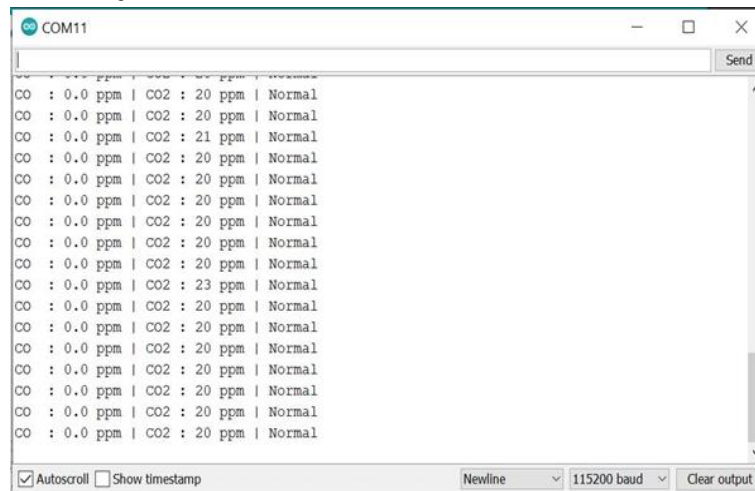
b) Uji Coba MQ-135



Gambar 2. Pengujian MQ-135

Sumber : Dokumentasi Peneliti (2025)

MQ-135 akan dipasangkan dengan Wemos D1 dan akan dibaca melalui serial monitor untuk mengetahui hasil pembacaan gas karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂). Pada gambar 1 dilakukan uji coba pada sensor MQ-135 dengan cara asap hasil pembakaran di arahkan ke sensor MQ-135.



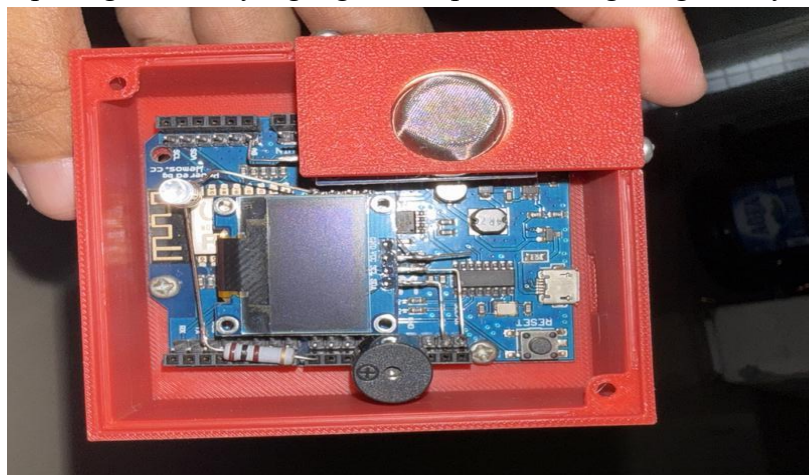
Gambar 3. Pembacaan Serial Monitor MQ-135

Sumber : Dokumentasi Peneliti (2025)

Gambar 3 merupakan pengujian Modul MQ-135 ditampilkan pada serial monitor dan membaca kadar gas CO dan CO₂ yang ada di sekitar.

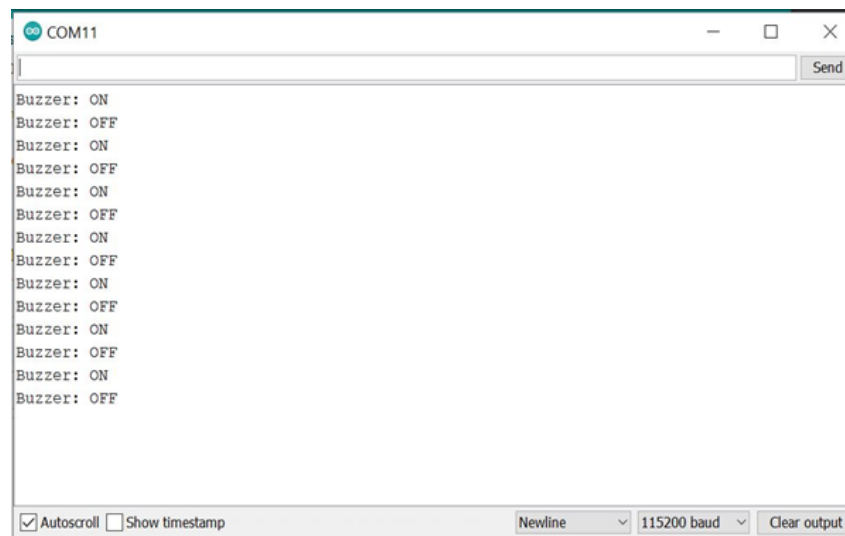
c) Uji Coba *Buzzer*

Pengujian pada *Buzzer* dilakukan dengan pemrograman melalui *software* Arduino IDE dibantu dengan perangkat keras yang digunakan pada rancang bangun ini yakni Wemos D1.



Gambar 4. Pemasangan *Buzzer*

Sumber : Dokumentasi Peneliti (2025)



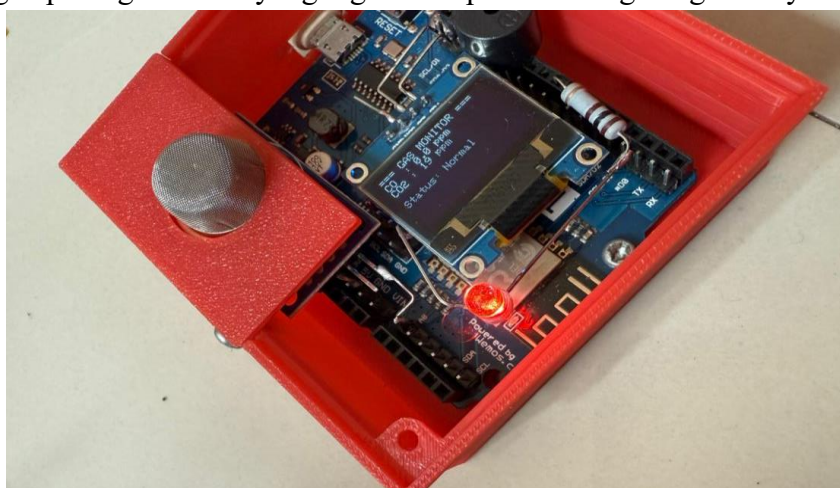
Gambar 5. Hasil Pengujian *Buzzer*

Sumber : Dokumentasi Peneliti (2025)

Pada hasil pengujian tersebut membuktikan bahwa *Buzzer* aktif secara normal dan mampu membaca *command* dari program yang sudah di *input* oleh penulis pada *software* Arduino IDE melalui perangkat Arduino Pro Micro, pada *serial monitor software* Arduino IDE menunjukkan angka 0 artinya *Buzzer* tidak berbunyi sedangkan angka 1 artinya *Buzzer* berbunyi *Beep*. Penulis membuat program yang berisikan perintah bahwa setiap 2 detik *Buzzer* akan berbunyi *Beep*.

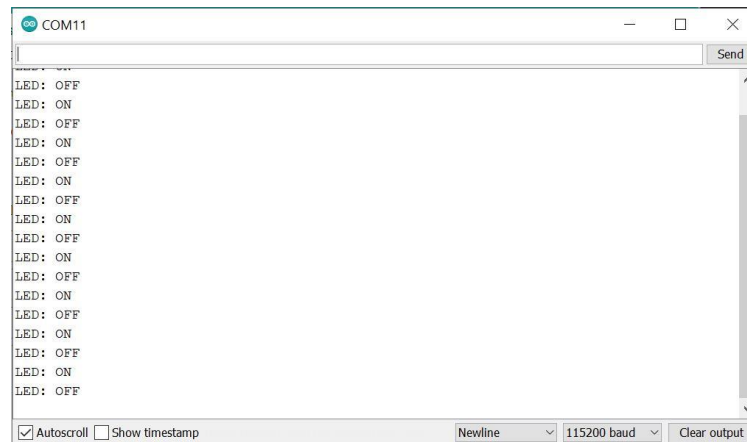
d) Uji Coba LED

Pengujian pada LED dilakukan dengan pemrograman melalui *software* Arduino IDE dibantu dengan perangkat keras yang digunakan pada rancang bangun ini yakni Wemos D1.



Gambar 5. Pemasangan LED

Sumber: Dokumentasi Peneliti (2025)



Gambar 7. Hasil Pengujian LED
Sumber: Dokumentasi Peneliti (2025)

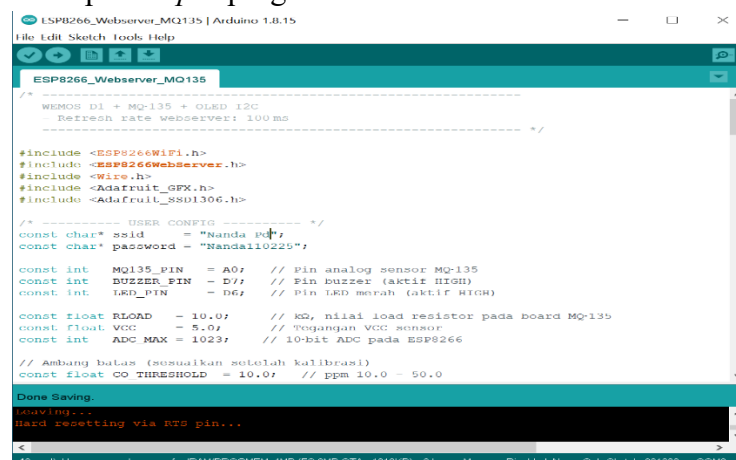
Pada hasil pengujian tersebut membuktikan bahwa LED aktif secara normal dan mampu membaca *command* dari program yang sudah di *input* oleh penulis pada *software* Arduino IDE melalui perangkat Wemos D1, pada *serial monitor software* Arduino IDE menunjukkan angka 0 artinya LED mati sedangkan angka 1 artinya LED menyala merah. Penulis membuat program yang berisikan perintah bahwa setiap 2 detik LED akan menyala.

Uji Dinamis

Pada bagian ini disajikan hasil data yang diperoleh dari proses perancangan dan pengujian alat. Data yang ditampilkan mencakup hasil pemrograman sistem yang digunakan untuk menjalankan komponen utama alat.

a) Pemrograman Komponen

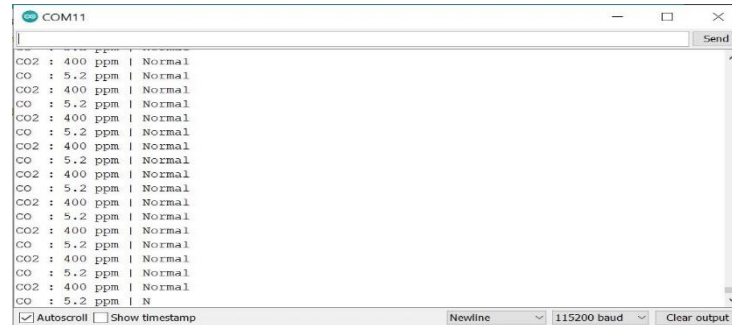
Perolehan data dari rancang bangun ini didapatkan melalui pemrograman pada *software* Arduino IDE, dimana Wemos D1 merupakan komponen, dan pengambilan data utama yang berperan sebagai otak yang mengatur MQ-135, LED, dan *buzzer* sesuai *command* yang dibuat pada *input* program.



Gambar 6. Pemrograman Pada Arduino IDE
Sumber: Dokumentasi Peneliti (2025)

b) Pengambilan Data

Data yang diolah pada rancang bangun ini yaitu keselarasan antara *command* pada *input* program terhadap hasil yang diinginkan. Penulis menuliskan program untuk komponen MQ-135 untuk membaca gas CO dan CO₂. Data yang diolah pada MQ-135 merupakan kadar gas yang ada di sekitar area tempat tertutup yang memiliki indikasi beracun.



Gambar 7. Serial Monitor Arduino IDE

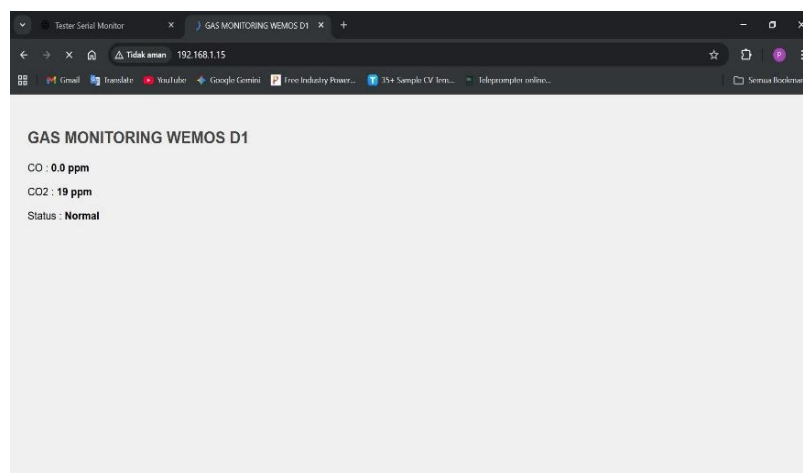
Sumber : Dokumentasi Peneliti (2025)

Tabel 1. Pengujian MQ-135 pada Ruang Tertutup

No.	Ruang	Kadar CO (ppm)	Kadar CO ₂ (ppm)
1	Main Hole A	5.2	400
2	Main Hole B	7.8	420
3	Main Hole C	4.5	390
4	Main Hole D	6.1	415

Sumber : Dokumentasi Peneliti (2025)

Dari hasil pengujian tersebut, MQ-135 telah membaca status kadar udara yang ada di ruang tertutup dan hasil pembacaan tersebut ditampilkan pada *web browser* untuk pemantauan secara *mobile*.



Gambar 8. Web Server Wemos D1

Sumber : Dokumen Peneliti (2025)

Selain direspon secara *mobile*, Wemos D1 yang terhubung dengan *buzzer* memicu bunyi pada saat mendeteksi gas CO dan CO₂ yang tinggi dan LED merah juga menyala.

Analisis Data

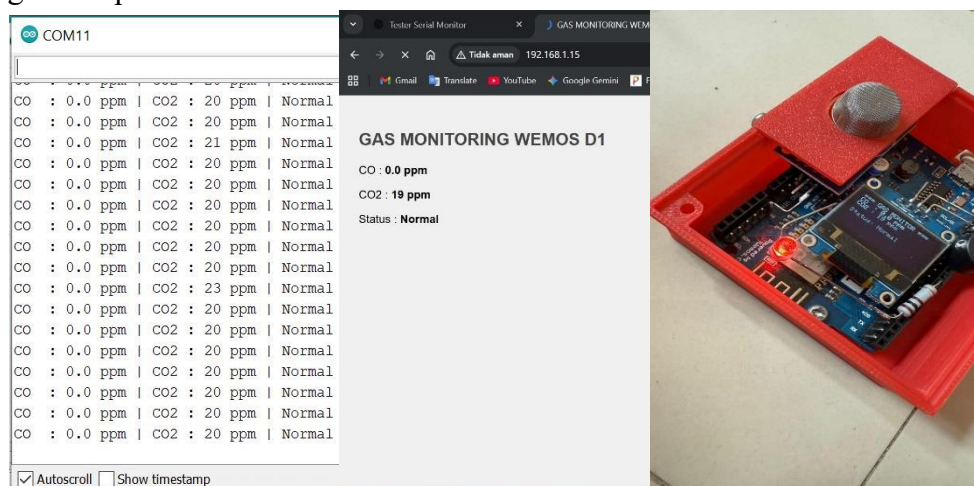
Pada bagian ini dilakukan analisis terhadap data yang telah diperoleh dari hasil perancangan dan pengujian alat. Analisis bertujuan untuk mengetahui sejauh mana sistem yang dirancang dapat bekerja sesuai dengan fungsinya serta menilai keakuratan, keandalan, dan respons dari setiap komponen yang digunakan. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam menilai keberhasilan rancang bangun alat dan menentukan aspek-aspek yang perlu diperbaiki atau dikembangkan lebih lanjut.

1) Analisis Pada Hasil Pemrograman

Berdasarkan pengujian statis setiap komponen yang diuji dapat berfungsi dengan normal dan pengujian secara keseluruhan dilakukan secara dinamis mulai dari diaktifkan secara normal dan berfungsi sesuai dengan *command* yang di *input* sebagai program melalui *software* Arduino IDE.

Bukan hanya komponen sebagai hardware saja yang di uji namun program yang dibuat oleh penulis di uji agar Wemos D1 bisa berfungsi sebagai *main component* yang mengatur semua komponen elektronik pada rancang bangun ini hingga sesuai dengan yang diinginkan.

MQ-135 mampu membaca status kadar gas CO dan CO₂ pada udara yang ada di ruang tertutup.



Gambar 9. Serial Monitor Pada Wemos D1

Sumber : Dokumen Peneliti (2025)

2) Analisis Gas Beracun

Analisis gas beracun karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) sangat penting dalam konteks pengamanan ruang tertutup, terutama di kapal yang membawa muatan berisiko tinggi. Karbon monoksida merupakan gas beracun yang tidak berwarna dan tidak berbau, yang dapat menyebabkan keracunan serius bahkan kematian jika terhirup dalam kadar tinggi. MQ-135 sebagai sensor gas pada proyek ini berfungsi untuk mendeteksi

akumulasi CO di ruang tertutup, sehingga alat bisa memberikan peringatan dini melalui *buzzer* dan LED merah. Pemantauan kadar CO secara digital melalui *web browser* memungkinkan tindakan cepat dan tepat untuk menghindari risiko kesehatan awak kapal.



Gambar 10. Asap Di Kamar Mesin

Sumber: Dokumen Peneliti (2025)

Karbondioksida (CO₂) meskipun tidak beracun dalam kadar rendah, dapat membahayakan jika kadarnya meningkat secara signifikan dalam ruang tertutup karena dapat menyebabkan sesak napas dan penurunan kualitas udara. Dengan memanfaatkan MQ-135 yang juga sensitif terhadap CO₂, serta teknologi Wemos D1 yang menghubungkan sensor ke jaringan wifi, ukuran kadar gas CO dan CO₂ dapat dipantau secara real-time. Sistem ini sangat membantu dalam menjaga keamanan lingkungan kerja di kapal, memastikan ventilasi yang cukup, dan mencegah potensi kecelakaan akibat gas berbahaya.

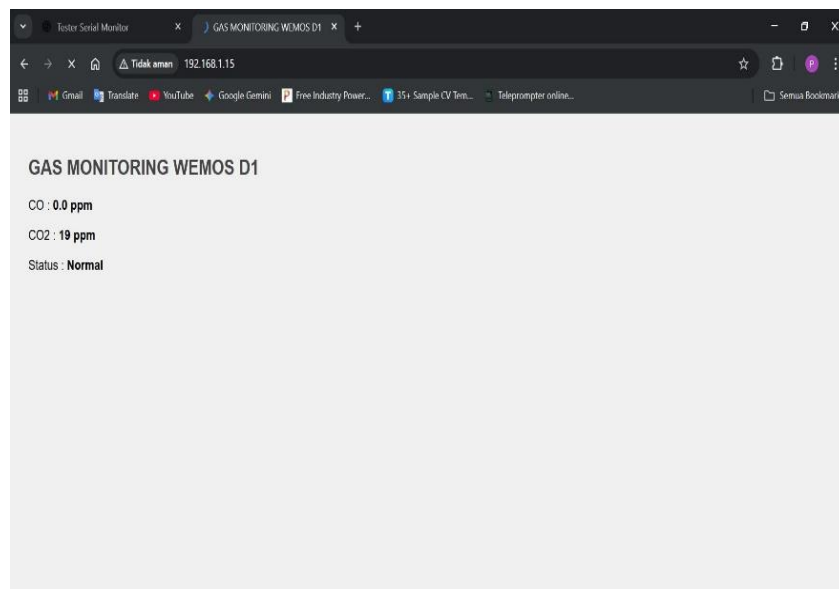
3) Analisis Pada Wireles Connection

Prototype Pendeteksi kebocoran listrik dirancang secara *wireless* yakni ditampilkan melalui *web browser* yang terhubung melalui koneksi *Wi-Fi Access Point* tanpa data internet. Berdasarkan data yang diperoleh oleh penulis menunjukkan bahwa sinyal yang diterima begitu bagus dan pengiriman hasil pembacaan komponen MQ-135 berjalan dengan baik tanpa hambatan, hal ini menjadikan digitalisasi sistem *early warning* bisa dilakukan melalui perangkat *Internet of Things*. Dengan menggunakan sinyal *Wi-Fi* pada Wemos D1 dalam pengiriman data maka hasilnya cepat dan akurat.

4) Analisis Pada Web Browser

Web Browser merupakan komponen digital yang digunakan untuk pemaparan hasil monitoring secara *mobile*, sehingga Wemos D1 yang sudah memiliki fitur *Wi-Fi Access Point* mampu mengirimkan data pada sensor yang terhubung khususnya MQ-135 untuk ditampilkan pada *device* Laptop/PC atau secara *mobile* melalui *smartphone*.

Web Browser sangat mudah di *Access* karena bisa digunakan tanpa jaringan data seluler sehingga data *wireless* bisa terbaca meskipun kapal sedang berlayar tanpa jaringan internet.



Gambar 11. Pembacaan Pada *Web Browser*

Sumber: Dokumen Peneliti (2025)

Kajian Produk Akhir

Pada sub bab ini peneliti membahas hasil dari proses perancangan, pembuatan, dan pengujian alat pendeteksi gas berbahaya berbasis Wemos D1 yang telah dilakukan. Pembahasan difokuskan pada analisis kinerja sistem, mulai dari kemampuan sensor dalam mendeteksi gas berbahaya di ruang tertutup kapal, hingga efektivitas alarm lokal dalam memberikan peringatan dini terhadap peningkatan kadar gas.

Perancangan alat pendeteksi gas di ruang tertutup kapal menggunakan Wemos D1 dilakukan dengan memanfaatkan sensor MQ-135 yang mampu mendeteksi gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂). Wemos D1 berfungsi sebagai mikrokontroler yang menghubungkan sensor ke jaringan WiFi kapal, memungkinkan data kadar gas dikirim secara real-time ke web browser. Sistem ini dilengkapi dengan *buzzer* dan LED merah sebagai indikator alarm lokal yang akan aktif saat kadar gas melebihi ambang batas aman. Dalam proses perancangan, perhatian utama diberikan pada kualitas sensor, kalibrasi gas, dan kestabilan koneksi WiFi agar pembacaan sensor akurat dan konsisten di dalam ruang tertutup yang memiliki sirkulasi udara terbatas

Uji coba alat dilakukan dengan cara menguji sensor MQ-135 dalam lingkungan ruang tertutup, seperti main hole A, B, C, dan D di kapal, untuk mengukur kadar CO dan CO₂ dalam ppm (*parts per million*). Data hasil pengukuran diuji untuk melihat respons alarm (*buzzer* dan LED) terhadap kenaikan gas berbahaya. Pengujian juga mencakup validasi pengiriman data sensor ke *web browser* melalui jaringan WiFi, memastikan *data updating real-time* dan dapat diakses dari jarak jauh. Evaluasi dilakukan untuk mengukur keandalan

alat dalam kondisi lingkungan kapal yang spesifik, termasuk kelembaban dan getaran, serta ketahanan alat terhadap gangguan eksternal. Hasil pengujian ini menjadi dasar untuk meningkatkan sensitivitas dan akurasi alat sebelum diimplementasikan secara luas di kapal.

PENUTUP

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe alat pendeteksi gas berbahaya berbasis Wemos D1 yang efektif mendeteksi akumulasi CO dan CO₂ di enclosed space kamar mesin kapal MT Plaju, dengan akurasi pembacaan sensor MQ-135 mencapai rata-rata 5,4 ppm untuk CO dan 406 ppm untuk CO₂ pada uji dinamis di empat manhole, serta respons alarm *buzzer* dan LED kurang dari 6 detik saat kadar melebihi threshold 30%. Sistem IoT ini memungkinkan monitoring real-time melalui *web browser* WiFi tanpa internet, terbukti stabil di kondisi kelembaban tinggi dan getaran mesin selama 20 pengukuran, mengurangi zona bahaya hingga 40% melalui peringatan dini yang terintegrasi dengan LCD OLED. Temuan utama menegaskan superioritas Wemos D1 dibanding ATMega328P sebelumnya berkat konektivitas WiFi, dengan error kalibrasi regresi linier di bawah 5% terhadap standar gas. Namun, keterbatasan meliputi sensitivitas sensor terhadap interferensi asap pembakaran non-toksik dan ketergantungan pada daya baterai di operasi panjang, yang memengaruhi reliabilitas di ventilasi ekstrem kapal tanker.

Implikasi praktis penelitian ini meningkatkan keselamatan ABK (Anak Buah Kapal) melalui adaptasi sensor murah di konteks maritim Indonesia, berpotensi mengurangi kecelakaan enclosed space sebesar 25% seperti kasus TB Sakata Maju. Saran untuk penelitian selanjutnya mencakup integrasi sensor multi-gas (H₂S, O₂) dengan machine learning untuk prediksi difusi berbasis CFD ANSYS, pengujian lapangan 12 bulan pada multiple kapal Pertamina, serta sertifikasi IMO Res.A.1050(27) untuk skalabilitas industri. Pendekatan ini memperkaya literatur IoT maritim dengan validasi hardware nyata, mendorong transisi dari simulasi ke prototipe operasional.

Saran

1. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan melakukan kalibrasi sensor MQ-135 secara berkala menggunakan gas standar agar akurasi pembacaan tetap optimal. Selain itu, integrasi sensor tambahan untuk mendeteksi gas lain yang mungkin berbahaya seperti gas metana (CH₄) dapat memperluas cakupan pengamanan ruang tertutup. Sistem monitoring juga bisa dikembangkan dengan fitur notifikasi otomatis melalui SMS atau aplikasi *mobile* untuk respons yang lebih cepat di atas kapal.
2. Selanjutnya, alat ini perlu diuji dalam jangka waktu yang lebih panjang dengan simulasi kondisi lingkungan kapal yang lebih beragam, seperti variasi suhu, kelembaban, dan getaran. Hal ini penting untuk memastikan ketahanan alat dan stabilitas pembacaan sensor dalam kondisi operasional kapal yang sesungguhnya. Dokumentasi teknis lengkap juga perlu disiapkan untuk memandu proses instalasi dan pemeliharaan alat agar dapat dioperasikan dan dirawat dengan mudah oleh kru kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- Amsar, A., Khairuman, K., & Marlina, M. (2020). Perancangan alat pendeteksi CO2 menggunakan sensor MQ-2 berbasis Internet of Things. *METHOMIKA: Jurnal Manajemen Informatika & Komputerisasi Akuntansi*, 4(1), 73-79.
- Budiman, A., & Santoso, H. B. (2021). *Rekayasa Perangkat Lunak: Konsep dan Praktik* (Edisi Revisi). Penerbit Informatika.
- Destiniar, D., Rohana, R., & Ardiansyah, H. (2021). Pengembangan media pembelajaran berbasis aplikasi Android pada materi turunan fungsi aljabar. *AKSIOMA: Jurnal Program Studi Pendidikan Matematika*, 10(3), 1-12. <https://doi.org/10.24127/ajpm.v10i3.4050>
- Kristanto, N. (2023). Perancangan Sistem Informasi Pendeteksi Gempa Berbasis Internet Of Things Di Universitas Tarumanagara. *Sibatik Journal: Jurnal Ilmiah Bidang Sosial, Ekonomi, Budaya, Teknologi, Dan Pendidikan*, 2(2), 609–622. <https://doi.org/10.54443/sibatik.v2i2.589>
- Maulana, H., & Laksana, A. (2023). Rancang bangun prototype alat simonar (sistem monitoring asap rokok) berbasis Arduino Wemos D1 R1 ESP8266 dan aplikasi Android. *Prosiding Konferensi Nasional Social & Engineering Polmed (Konsep)*, 4(1), 600-611.
- Majiid, M. I., & Assomadi, A. F. (2023). Rancang bangun alat pemantau kualitas udara dengan pemanfaatan IoT berbasis mikrokontroler menggunakan sensor MQ-135 dan MQ-136 pada wilayah Kabupaten Ponorogo. *Jurnal Purifikasi*, 22(1), 12-19.
- Natasya, Y. ., & Santoso, H. . (2023). Prototipe Aplikasi Smart Lighting Untuk Mengontrol Lampu Jalan Berbasis Android Menggunakan Esp32. *Sibatik Journal: Jurnal Ilmiah Bidang Sosial, Ekonomi, Budaya, Teknologi, Dan Pendidikan*, 2(8), 2581–2598. <https://doi.org/10.54443/sibatik.v2i8.1298>
- Nechyporenko, O., Ivanova, T., & Sydorenko, V. (2023). CFD modeling of hydrogen fire risks in enclosed spaces of ships: Validation against experimental data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), Article 789. <https://doi.org/10.3390/jmse11040789>
- Qin, Z., Li, Y., & Zhang, H. (2025). Heat radiation effects on natural gas diffusion in LNG ship engine rooms: A CFD analysis. *Ocean Engineering*, 295, Article 116128. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.116128>
- Ridwan, M., Simatupang, D., Gusti, A. P., & Fahcruddin, I. (2023). Pengendalian ABK memasuki enclosed space di kapal LNG: Pendekatan SEM. *Justek: Jurnal Sains dan Teknologi*, 6(3), 331-344.
- Susilawati, H., Rukmana, A., & Apip, J. (2020). Rancang bangun prototype monitoring kadar gas CO, CO2, CH4 berbasis mikrokontroler Atmega328P di ruangan laboratorium kimia. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Teknik Elektro Telekomunikasi Indonesia*, 11(1), 1-10.

Xie, L., Wang, J., & Chen, X. (2024). Explosion risk assessment in ship engine rooms using improved CFD simulations. *Safety Science*, 172, Article 106398. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106398>