

Sistem Monitoring Real-Time Deteksi Gas Beracun H₂S pada Ruang Terbatas Berbasis Internet of Things (IoT)

¹Romdhoni, ²Yazid zahari, ³Yoka Mustopa, ⁴Amirudin, ⁵Fahmi Yunistyawan, ⁶Fastha Bernad Fernandes.

^{1,2,3,4,5,6}Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Bina Bangsa

E-mail: romdhonibinabangsa@gmail.com

ABSTRACT

Confined work environments such as tanks, silos, ducting, and pipelines present high occupational safety risks due to the potential accumulation of hazardous gases, including methane (CH₄), carbon monoxide (CO), and hydrogen sulfide (H₂S). Conventional gas detection devices generally suffer from several limitations, such as relatively high costs, lack of real-time remote monitoring capabilities, and limited historical data recording. This study proposes the design and implementation of an Internet of Things (IoT)-based hazardous gas monitoring and detection system to enhance worker safety in confined space operations. The system is developed using low-cost gas sensors (MQ-135 and MQ-9) integrated with an ESP32 microcontroller, equipped with a local display and remote notification features via the Telegram platform. Experimental testing was conducted in a closed drum environment with simulated hazardous gas injection. The results indicate that the proposed system achieves an average detection accuracy of 90–94% with a response time of less than 5 seconds. Furthermore, the system demonstrates low power consumption and high scalability for remote monitoring applications. These findings suggest that the developed system is reliable and has strong potential for implementation in industrial sectors such as construction, oil and gas, and waste management, while supporting occupational safety standards in accordance with OSHA 1910.146.

Keywords : Internet of Things, Gas Detection, Confined Spaces, Occupational Safety

ABSTRAK

Lingkungan kerja ruang terbatas seperti tangki, silo, ducting, dan pipa memiliki tingkat risiko keselamatan yang tinggi akibat potensi akumulasi gas berbahaya, antara lain metana (CH₄), karbon monoksida (CO), dan hidrogen sulfida (H₂S). Perangkat deteksi gas konvensional umumnya memiliki keterbatasan berupa biaya yang relatif tinggi, tidak tersedianya pemantauan jarak jauh secara waktu nyata, serta keterbatasan dalam pencatatan data historis. Penelitian ini mengusulkan perancangan dan implementasi sistem monitoring dan deteksi gas berbahaya berbasis Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan keselamatan pekerja pada pekerjaan ruang terbatas. Sistem dikembangkan menggunakan sensor gas berbiaya rendah MQ-135 dan MQ-9 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32, dilengkapi tampilan lokal serta notifikasi jarak jauh melalui platform Telegram. Pengujian dilakukan pada media drum tertutup dengan penyuntikan gas berbahaya simulasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi keberadaan gas dengan tingkat akurasi rata-rata sebesar 90–94% dan waktu respons kurang dari 5 detik. Selain itu, sistem memiliki konsumsi daya yang rendah serta fleksibilitas pengembangan untuk pemantauan jarak jauh. Berdasarkan hasil tersebut, sistem yang diusulkan dinilai andal dan berpotensi diterapkan pada sektor industri seperti konstruksi, minyak dan gas, serta pengelolaan limbah, serta mendukung penerapan standar keselamatan kerja sesuai OSHA 1910.146. Kata Kunci: Trafo distribusi 20 kV, Arduino Uno, sensor PIR, sistem pengamanan.

Kata Kunci: Internet of Things, Deteksi Gas, Ruang Terbatas, Keselamatan Kerja

PENDAHULUAN

Ruang terbatas adalah area kerja yang tidak dirancang untuk hunian manusia karena dapat menyenangkan kematian yang disebabkan oleh akumulasi gas berbahaya dan mudah meledak karena itu pekerjaan pada ruangan terbatas memerlukan regulasi dan izin yang sangat ketat (OSHA 2023). Kecelakaan kerja pada ruangan terbatas masih menjadi fatalitas utama pada sektor industri. Akumulasi gas beracun seperti Metana dan Karbon Monoksida terjadi sangat cepat yang disebabkan oleh ventilasi udara yang buruk. Di Indonesia sendiri masih sering terjadi kecelakaan kerja pada ruangan terbatas, khususnya pada lingkungan kerja Konstruksi pabrik serta Pembangkit Listrik, pada project PLTU 9&10 Suralaya tercatat kecelakaan kerja pada ruangan terbatas sekitar 15 orang, hal ini disebabkan oleh akumulasi gas beracun yang berasal dari asap pembakaran besi stainless dan juga pengelasan, metode dengan menggunakan gas Konvensional sering menjadi kendala karena tidak adanya sistem pemantauan Gas berkelanjutan dan terintegrasi. Perkembangan Teknologi internet of Things (IOT) membuka banyak peluang baru khususnya dalam sektor keselamatan kerja pada pekerjaan ruang terbatas melalui Pemantauan kondisi lingkungan secara terus-menerus serta terkoneksi dengan internet. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem Deteksi gas berbahaya berbasis Iot yang ekonomis, mudah diterapkan, serta mampu memberikan peringatan dini lokal maupun jarak jauh.

Tujuan penelitian ini antara lain:

1. Merancang dan Mengimplementasikan Sistem deteksi gas berbahaya berbasis Iot untuk ruangan terbatas.
2. Menganalisis kinerja sistem dalam hal Akurasi, waktu respon dan juga konsumsi daya.
3. Mengevaluasi efektifitas notifikasi jarak jauh serta aksesibilitas pengguna untuk mendukung keselamatan kerja.

Studi ini mengatasi kesenjangan literatur yang ada dengan menggabungkan beberapa sensor gas yang luas, menggabungkan tampilan lokal dan pemberitahuan jarak jauh, serta melakukan pengujian dalam tangki kecil. Modularitas sistem memungkinkan adaptasi yang mudah ke berbagai lingkungan, menjadikannya alat yang efisien dalam pemantauan pada Pekerjaan Ruang tertutup Oleh insinyur Keselamatan.

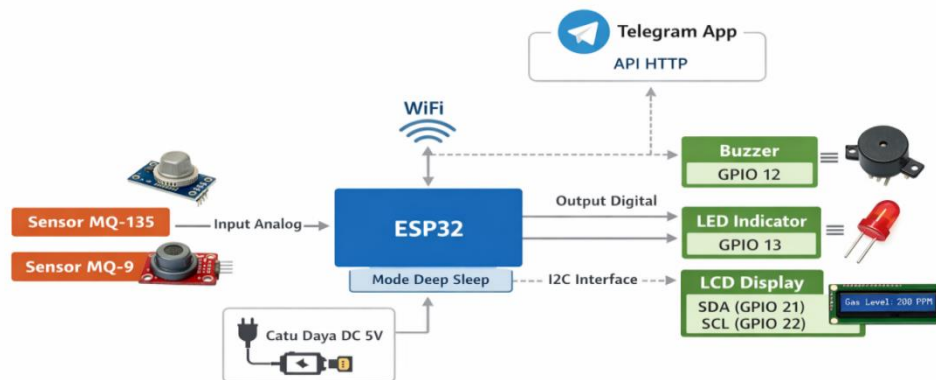
Tinjauan Pustaka

Teknologi deteksi gas telah berkembang pesat seiring dengan integrasi IoT. Sensor semikonduktor, khususnya seri MQ, banyak digunakan karena harganya yang terjangkau dan sensitivitasnya. Sensor MQ135, yang berbasis timah dioksida (SnO₂), mendeteksi berbagai gas dengan mengukur perubahan konduktivitas listrik ketika terpapar molekul target (Wang dkk., 2018). Demikian pula, sensor MQ9 menggunakan mekanisme serupa tetapi dikalibrasi untuk gas yang mudah terbakar seperti CO dan hidrokarbon, dengan rentang deteksi 10-1000 ppm untuk CO (Lembar Data MQ9, 2021). Penelitian oleh Kumar dkk. (2020) menunjukkan sistem deteksi gas berbasis ESP32 yang mencapai akurasi 80-95% untuk aplikasi rumah tangga, tetapi kurang memiliki integrasi multi-sensor dan fitur pemberitahuan jarak jauh. Rao dkk. (2019) mengeksplorasi sistem berbasis aktuator dengan buzzer dan LED, menunjukkan peringatan lokal yang efektif tetapi tanpa

konektivitas IoT. Silva dkk. (2021) menyoroti manfaat bot Telegram untuk pemberitahuan IoT, melaporkan peningkatan keterlibatan pengguna dalam sistem rumah pintar. Tantangan pada sensor MQ meliputi sensitivitas silang terhadap kelembaban dan suhu, yang memerlukan algoritma kalibrasi. Arsitektur dual-core ESP32 dan mode daya rendah menjadikannya ideal untuk IoT, seperti yang dicatat oleh Espressif Systems (2022). Studi perbandingan menunjukkan bahwa sistem yang mendukung IoT mengungguli detektor tradisional dalam hal skalabilitas dan akses data waktu nyata (Lee et al., 2022). Penelitian ini melanjutkan penelitian sebelumnya dengan mengintegrasikan MQ135 dan MQ9 untuk deteksi multi-gas, menambahkan LCD I2C untuk umpan balik lokal, dan menggunakan Telegram untuk pemantauan jarak jauh yang aman dan ramah pengguna. Penelitian ini juga mencakup analisis kinerja terperinci di ruang tertutup, dengan mempertimbangkan variabel lingkungan seperti ventilasi dan penyebaran gas.

METODE PENELITIAN

Desain sistem ini menggunakan arsitektur modular yang dimana terdiri dari beberapa lapisan seperti Perangkat Keras dan Perangkat Lunak serta Komunikasi. Lapisan perangkat keras meliputi Sensor untuk akuisisi data, aktuator untuk peringatan dan unit tampilan untuk visualisasi. Sedangkan Lapisan Perangkat Lunak untuk menangani pemrosesan data serta pengambilan keputusan, sementara Lapisan komunikasi untuk mengelola konektivitas WIFI dan Integrasi Telegram.



1. Gambar Diagram Blok Sistem Monitoring Deteksi Gas Berbahaya

Prinsip kerja sistem ini secara keseluruhan adalah sebagai berikut : Sistem dirancang pada sebuah papan/Kardus dengan di proteksi akrilik sebagai casing dari sistem ini lalu ditempatkan pada sebuah Tangki/Coalsilo yang sedang ada pekerjaan didalamnya untuk mendeteksi kebocoran gas/ akumulasi gas berbahaya. Ketika sensor MQ-135 dan MQ-9 mendeteksi akumulasi gas ataupun kebocoran gas pada tanki lalu mengirimkan input sinyal analog pada Esp32, Esp32 membaca sinyal ini lalu mengolah sinyal analog menjadi digital dan melakukan kalibrasi nilai sensor dengan ambang batas sensor dengan satuan ppm, jika nilai sensor aman maka Lcd menampilkan aman namun jika nilai melebihi ambang batas

yang telah di tentukkan maka Lcd meanampilkan Tulisan bahaya dan Mengaktifkan Buzzer serta LED merah menyala, selain peringatan lokal diatas Esp32 juga mengirimkan notifikasi real-time ke telegram menggunakan wifi dan Api http, setelah proses pengiriman sinyal selesai Esp32 kembai masuk ke mode Deep sleep untuk menghemat komsumsi daya karena menggunakan baterai.

3.2 Implementasi Perangkat Keras

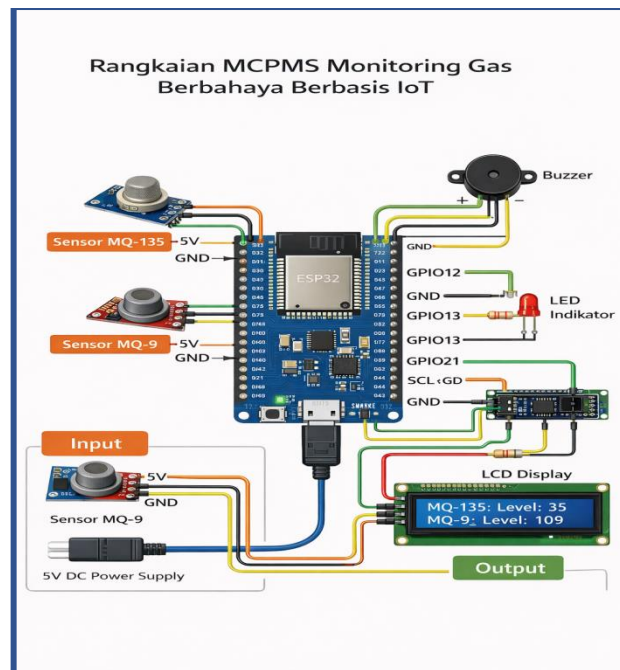
Tabel 1. Spesifikasi Komponen Sistem

KOMPONEN	SPESIFIKASI TEKNIS	FUNGSI DALAM SISTEM
ESP32	Mikrokontroler: Dual-core Xtensa® 32-bit LX6 Tegangan kerja: 3,3 V Tegangan input: 5 V (melalui VIN) Frekuensi clock: hingga 240 MHz Memori Flash: hingga 4 MB ADC: 12-bit Antarmuka komunikasi: WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth, I2C, SPI, UART Mode hemat daya: Deep Sleep	Pusat kendali sistem yang melakukan pemerosesan serta mengirimkan hasil sinyal yang di proses serta koneksi internet.
Sensor MQ-135	Tegangan kerja : 5V DC Jenis keluaran : Analog Rentang deteksi CO2 :10-1000 PPM NH3:10-1000 PPM	Mendeteksi kualiatas udara dan Kebocoran gas beracun
Sensor MQ-9	Tegangan kerja : 5V DC Jenis keluaran : Analog Rentang deteksi : Karbon Monoksida : 10-1000 PPM Gas mudah terbakar (LEL) Waktu pemanasan sensor : 20-30 Detik	Mendeteksi kualitas udara serta mendeteksi Kebocoran gas yang mudah terbakar
Buzzer Aktif	Jenis: Active Buzzer Tegangan Kerja: 3-12V DC Arus Kerja: 20-35 mA Frekuensi: 2-4 kHz Level Suara: ±85 dB @ 10 cm Dimensi: Ø12 × 9,5 mm	Memberikan alarm audio lokal ketika sistem mendeteksi intruksi
LED Indikator	Jenis: LED 5mm Warna: Merah (alarm) Tegangan Maju: 1,8-2,2V Arus Kerja: 10-20 mA Sudut Pancar: ±30° Dimensi: Ø5 mm	Indikator visual status sistem:merah (alarm aktif)
Resistor	Nilai: 220Ω (untuk LED), 10kΩ (pull-down) Daya: 1/4 Watt	Pembatas arus LED dan <i>pull-down</i> resistor untuk <i>input</i> digital

KOMPONEN	SPESIFIKASI TEKNIS	FUNGSI DALAM SISTEM
	Toleransi: $\pm 5\%$	
Power Supply	<i>Input:</i> 220V AC <i>Output:</i> 12V DC, 1A <i>Tipe:</i> Switching adapter	Menyuplai daya ke ESP32 dan seluruh komponen sistem
Jumper Wires	<i>Jumper Wires:</i> Male-to-male, Male-to-	Prototyping dan koneksi antar komponen
LCD 12C	Jenis : Karakter LCD 16x2 Tegangan kerja : 5V Antar muka komunikasi : 12C 12C koneksi : SDA : GPIO 21 dan SCL : GPIO 22	Tampilan lokal untuk konsentrasi gas dan setatus kondisi lingkungan
Telegram APP (API HTTP)	Protokol komunikasi : HTTPS Metode Api : Bot Telegram Format Data : JSON	Platform monitoring jarak jauh yang menerima notifikasi ketika terjadinya bahaya

3.3. Skema Rangkaian dan FlowChart Alir Sistem

Skema rangkaian lengkap sistem monitoring deteksi gas berbahaya berbasis *internet of things* dapat dilihat pada gambar 2, yang menyajikan inter koneksi detail antara Esp32 dengan semua komponennya.



Gambar 2. Skema rangkaian lengkap sistem monitoring deteksi gas berbahaya antara ESP32 sebagai mikrokontroler dengan seluruh komponen lainnya.

Koneksi pin Arduino Uno dengan komponen sistem adalah sebagai berikut:

1. Sensor MQ-135:

VCC → Pin 5V ESP32

GND → Pin GND ESP32

AO → Pin GPIO 35 ESP32

2. Sensor MQ-9:

VCC → Pin 5V ESP32

GND → Pin GND ESP32

AO → Pin GPIO 34 ESP32

3. Buzzer Aktif:

Positif (+) → Pin GPIO 12 ESP32

Negatif (-) → Pin GND ESP32

4. LED Merah (Alarm):

Anoda → Pin GPIO 13 ESP32

Katoda → Pin GND ESP32

5. LCD 12C:

VCC → Pin 5V ESP32

GND → Pin GND ESP32

SDA → Pin GPIO 21

SCL → Pin GPIO 22

6. Supply Power 5V DC

Sumber daya utama sistem, untuk menyuplay komponen komponen secara terpusat

Penggunaan resistor pembatas arus sebesar 220 Ω pada LED ditentukan berdasarkan perhitungan nilai hambatan menggunakan Hukum Ohm sebagai berikut:

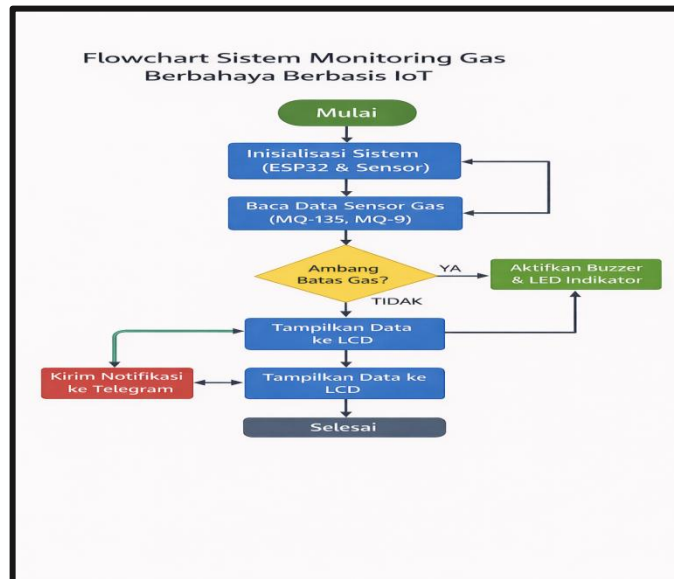
$$R = \frac{V_{Supply} - V_{Forward}}{I_{LED}}$$
$$R = \frac{5V - 2V}{0,015A} = 200 \Omega$$

Resistor pull-down 10k Ω pada input sensor PIR berfungsi memastikan pin input Arduino berada pada kondisi LOW (0V) ketika sensor tidak mengeluarkan sinyal, menghindari kondisi floating yang dapat menyebabkan pembacaan tidak stabil.

Alir Sistem

Alur sistem monitoring deteksi gas berbahaya ini sangatlah simple yang dimana ketika alat di nyalakan maka dia akan memanaskan sensor terlebih dahulu dengan kisaran waktu 30 detik, setelah memanaskan sensor maka mikrokontroler akan melakukan kalibrasi sensor serta ambang batasnya, ketika sensor membaca data dan data itu lebih dari ambang batas maka Esp32 akan mengirimkan sinyal kepada telegram dan juga Buuzzers serta LED

sebagai peringatan. Ketika gas sudah tidak terdeteksi maka Esp32 kembali ke mode deep sleep untuk menghemat daya serta melakukan pemantauan real-time.



Gambar 3. Flowchart alur keseluruhan sistem dari mulai hingga selesai dan kembali ke mode deep sleep

3.3 Implementasi Perangkat Lunak

```
1 #include <Arduino.h>
2 #include <Wire.h>
3 #include <hd44780.h>
4 #include <hd44780IoClass/hd44780_I2Cexp.h>
5
6 #include <WiFi.h>
7 #include <WiFiClientSecure.h>
8 #include <UniversalTelegramBot.h>
9
10 // ===== PIN ESP32 =====
11 #define MQ135_PIN 34
12 #define MQ9_PIN 35
13 #define BUZZER_PIN 12
14 #define LED_PIN 14
15
16 // ===== THRESHOLD =====
17 #define MQ135_THRESHOLD 500
18 #define MQ9_THRESHOLD 400
19
20 // ===== WIFI =====
21 const char* ssid = "RAZMA";
22 const char* password = "RA4Z3MA2";
23
24 // ===== TELEGRAM =====
25 #define BOT_TOKEN "8525812257:AAHhHbFQtZPFGI_DF-Yu-Anek6SoEgrazY"
26 #define CHAT_ID "7328145115"
27
```

Gambar 4. Pemegroraman Menggunakan Arduino IDE

Kode dikembangkan di Arduino IDE (versi 3.2.7) menggunakan pustaka C++:Pustaka Inti ESP32: Untuk manajemen WiFi dan GPIO.Pustaka

LiquidCrystal_I2C: Untuk kontrol LCD. Pustaka UniversalTelegramBot: Untuk integrasi bot.

Alur Algoritma:

- 1) Inisialisasi: Hubungkan ke jaringan WiFi dan inisialisasi sensor, LCD, dan bot Telegram dengan token API.
- 2) .Pengambilan Data: Baca nilai analog dari MQ135 dan MQ9 setiap 5 detik. Terapkan rumus kalibrasi: □ Untuk MQ135: Konsentrasi (ppm) = (nilai_analog / 4095) * 1000 (perkiraan untuk CO₂; disesuaikan untuk gas lain). Untuk MQ9: Konsentrasi (ppm) = (nilai_analog - nilai dasar) * faktor_sensitivitas (dikalibrasi menggunakan sampel gas yang diketahui).
- 3) .Pemeriksaan Ambang Batas: Bandingkan dengan ambang batas yang telah ditentukan (misalnya, CO > 50 ppm, CH₄ > 100 ppm). Jika terlampaui, picu peringatan.
- 4) .Output Lokal: Perbarui LCD dengan data waktu nyata (misalnya, "CO: 45 ppm (CH₄: 20 ppm") dan aktifkan bel/LED.
- 5) .Notifikasi Jarak Jauh: Kirim pesan ke ID obrolan Telegram, misalnya, "Peringatan: Kadar CO tinggi terdeteksi pada 60 ppm di ruang tertutup." Loop and Sleep: Ulangi; masuk ke mode tidur nyenyak jika tidak ada aktivitas untuk menghemat energi.

Proses Kalibrasi: Sensor dikalibrasi dalam lingkungan terkontrol menggunakan campuran gas standar (misalnya, 100 ppm CO dari kit kalibrasi). Pembacaan dasar diambil di udara bersih, dan kurva sensitivitas diplot untuk akurasi. Langkah-langkah Keamanan: API Telegram menggunakan HTTPS untuk komunikasi terenkripsi; WiFi menggunakan enkripsi WPA2.

3.4. Metode Pengujian Alat

Pengujian sistem dilakukan melalui pendekatan eksperimental kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja alat dalam mendeteksi gas berbahaya. Setiap skenario pengujian dilaksanakan sebanyak tiga kali pengulangan guna memastikan kestabilan dan konsistensi data yang diperoleh. Sebagai acuan pembandingan, digunakan gas detector portabel komersial yang berfungsi sebagai nilai referensi dalam perhitungan deviasi hasil pengukuran sensor.

Proses pengujian dilakukan pada ruang tertutup simulasi yang menyerupai kondisi confined space, seperti tangki atau ruangan kerja terbatas. Gas LPG dimasukkan secara terkontrol untuk mensimulasikan kebocoran gas, sementara pembakaran sampah tidak sempurna digunakan untuk menghasilkan gas karbon monoksida. Skenario ini dirancang agar mendekati kondisi operasional di lingkungan kerja nyata yang berisiko terhadap paparan gas berbahaya. Pengujian Performa sistem dilakukan berdasarkan beberapa paramater utama antara lain :

1. **Akurasi Deteksi** : akurasi dihitung berdasarkan perbandingan persentase kesesuaian antara nilai konsentasi gas yang ditampilkan pada LCD sistem dengan hasil pengukuran alat referensi seperti gas portabel dengan nilai presentase menggunakan satuan PPM.

2. **Waktu Respon** : Waktu respon di hitung/diukur dari mulainya sensor terpapar gas sampai sistem memberikan indikasi peringatan seperti notifikasi, LED dan Buzzer menyala.
3. **Konsumsi Daya** : Konsumsi daya diukur menggunakan Multimeter dengan mencatat kebutuhan daya sistem mulai dari dinyalakan hingga proses pengujian selesai.
4. **Faktor Lingkungan** : Pengujian dilakukan pada dua lokasi berbeda dengan rentang suhu antara 20–35 °C dan kelembapan 40–50%. Data hasil pengujian dicatat pada serial monitor dan tampilan LCD, kemudian dianalisis menggunakan Metode Statistik deskriptif untuk memperoleh nilai rata-rata dan juga simpangan bakunya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2. Data pengujian dan Perbandingan Sensor IOT dan Gas detektor portabel

skenario pengujian	jenis gas	rata-rata sensor sistem IOT% (PPM)	rata-rata gas detektor portabel % (PPM)	rasio
Kebocoran LPG	CH ₄	43	45	95.5
Pembakaran Sampah	CO	38	40	95
Gas Campuran	CO	52	55	94.5
Gas Campuran	CH ₄	61	65	93.8

Pada tabel 2. ini kita dapat melihat bahwa menunjukkan hasil perbandingan antara sensor IOT dan juga gas detektor portabel pada setiap skenario pengujian. Hasil menunjukkan tingkat kesesuaian tinggi dengan rasio 90-94% pada seluruh skenario, sehingga sistem dapat dikategorikan memiliki performa yang sangat baik.

Evaluasi Dan Diskusi

Tingkat akurasi sistem yang tinggi dipengaruhi oleh penggunaan integrasi beberapa sensor gas, yang mampu mengompensasi keterbatasan sensitivitas sensor individual. Sebagai contoh, sensitivitas sensor MQ-135 yang relatif rendah terhadap gas CH₄ dapat dikompensasi dengan keberadaan sensor lain yang memiliki karakteristik sensitivitas berbeda.

Waktu respons sistem dipengaruhi oleh waktu pemanasan (preheating) sensor serta proses difusi gas di dalam ruang tertutup. Setelah proses pemanasan awal selama ± 24 jam, sistem mampu memberikan respons rata-rata kurang dari 5 detik, yang masih tergolong cepat untuk aplikasi deteksi dini gas berbahaya. Dari sisi efisiensi energi, konsumsi daya sistem relatif rendah. Penggunaan mode hemat daya pada ESP32 memungkinkan sistem untuk dioperasikan dalam jangka waktu lama, sehingga berpotensi diterapkan di lokasi terpencil atau area dengan keterbatasan sumber listrik.

Variasi suhu dan kelembapan terbukti memengaruhi kinerja sensor gas. Pada suhu mendekati 35 °C, akurasi sistem mengalami penurunan hingga sekitar 85% akibat pergeseran karakteristik sensor. Hal ini menunjukkan pentingnya penerapan algoritma

kompensasi suhu dan kelembapan untuk meningkatkan keandalan sistem pada kondisi lingkungan yang dinamis. Integrasi notifikasi berbasis Telegram menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman peringatan sebesar 100%. Fitur ini sangat membantu petugas keselamatan dan kesehatan kerja (HSE) dalam melakukan pemantauan jarak jauh, khususnya pada pekerjaan berisiko tinggi seperti pengelasan (welding) dan pengecatan (painting) di ruang tertutup dengan interval pemantauan setiap 30 menit.

Meskipun sistem menunjukkan performa yang baik, terdapat beberapa tantangan yang perlu diperhatikan. Pertama, karakteristik sensor gas berbasis MQ masih sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, sehingga diperlukan kalibrasi berkala. Kedua, sistem belum dilengkapi mekanisme kompensasi suhu dan kelembapan secara otomatis. Selain itu, aspek keamanan dan privasi data pada sistem IoT perlu diperhatikan lebih lanjut untuk memastikan kepatuhan terhadap regulasi perlindungan data, seperti GDPR.

Kesimpulan Dan Saran

Kontribusi dan Kebaharuan Sistem

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah pengembangan sistem pemantauan gas berbahaya berbasis Internet of Things (IoT) yang dirancang secara khusus untuk mendukung keselamatan kerja pada lingkungan ruang terbatas (confined space). Sistem ini mengintegrasikan pendekatan multi-sensor gas, mekanisme peringatan dini secara real-time, serta notifikasi jarak jauh berbasis Telegram, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan kerja secara kontinu dan responsif.

Kebaharuan penelitian ini terletak pada pemanfaatan sensor gas berbiaya rendah yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 dalam arsitektur sistem yang modular dan hemat daya. Pendekatan ini memungkinkan sistem tidak hanya mudah diimplementasikan, tetapi juga fleksibel untuk dikembangkan lebih lanjut sesuai kebutuhan industri. Selain itu, sistem dirancang agar mudah diakses oleh petugas keselamatan dan kesehatan kerja (HSE) tanpa memerlukan infrastruktur yang kompleks.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan gas berbahaya berbasis IoT untuk pekerjaan di ruang terbatas dengan menggunakan sensor MQ-135 dan MQ-9, mikrokontroler ESP32, tampilan LCD sebagai antarmuka lokal, serta notifikasi jarak jauh melalui aplikasi Telegram. Berdasarkan hasil pengujian eksperimental pada ruang tertutup simulasi, sistem menunjukkan kinerja yang baik dalam mendeteksi keberadaan gas berbahaya dengan tingkat akurasi rata-rata berada pada rentang 90–94% dan waktu respons kurang dari 5 detik.

Penerapan arsitektur multi-sensor terbukti meningkatkan keandalan sistem dalam mendeteksi berbagai jenis gas serta mengurangi potensi kesalahan pembacaan akibat sensitivitas silang pada sensor tunggal. Selain itu, penggunaan fitur hemat daya pada ESP32 memungkinkan sistem beroperasi secara efisien untuk pemantauan jangka panjang, sehingga cocok diterapkan pada lokasi kerja dengan keterbatasan sumber daya listrik.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan dinilai layak digunakan sebagai solusi pendukung pemantauan keselamatan kerja di ruang terbatas dan relevan dengan prinsip-prinsip keselamatan kerja yang direkomendasikan dalam standar keselamatan internasional, seperti OSHA 1910.146.

Implementasi sistem ini juga memberikan implikasi praktis yang sangat signifikan bagi sektor industri, khususnya untuk mendukung pengambilan cepat keputusan bagi para Pekerja keselamatan (HSE). Sistem dapat di manfaatkan sebagai alat pemantauan pendukung sebelum, selama, dan setelah aktifitas kerja terbatas berlangsung sehingga dapat berpotensi menurunkan risiko kecelakaan kerja akibat paparan gas berbahaya yang terakumulasi serta meningkatkan keselamatan para pekerja di dalamnya.

Saran

Untuk meningkatkan kinerja dan cakupan aplikasi sistem ini, perlu di kembangkan lebih lanjut lagi, berikut adalah beberapa pertimbangan untuk mengembangkan aplikasi sistem ini antara lain :

1. Integrasi algoritma kompensasi suhu dan kelembapan guna meningkatkan stabilitas dan akurasi pembacaan sensor pada kondisi lingkungan ekstrem.
2. Penambahan sensor oksigen (O₂) untuk memberikan informasi keselamatan yang lebih komprehensif pada ruang terbatas.
3. Penerapan pembelajaran mesin (machine learning) untuk analisis prediktif dan deteksi dini potensi kondisi berbahaya.
4. Pengembangan aplikasi mobile khusus sebagai antarmuka pemantauan terpusat yang lebih interaktif dan Pengujian sistem secara langsung pada berbagai lingkungan ruang terbatas nyata, seperti terowongan, tambang, dan instalasi pengolahan limbah

DAFTAR PUSTAKA

- 1) Ahn, J., Lee, J., & Kim, S. (2019). Design of low-power IoT gas monitoring systems for industrial safety applications. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(7), 1–12. <https://doi.org/10.1177/1550147719861567>
- 2) Al-Habaibeh, A., et al. (2020). Smart sensing for occupational safety in confined spaces using IoT technologies. *Safety Science*, 128, 104742. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104742>
- 3) Espressif Systems. (2022). ESP32 Series Datasheet. Espressif Systems Official Documentation.
- 4) González, I., Calderón, A. J., & Figueiredo, J. (2019). Wireless sensor network-based monitoring system for confined space environments. *Sensors*, 19(6), 1348. <https://doi.org/10.3390/s19061348>
- 5) Hanwei Electronics. (2021). MQ-135 Gas Sensor Datasheet. Hanwei Electronics Co., Ltd.
- 6) Hanwei Electronics. (2021). MQ-9 Gas Sensor Datasheet. Hanwei Electronics Co., Ltd.

- 7) Hassan, M., et al. (2020). IoT-enabled real-time gas monitoring system using ESP32 for industrial safety. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(4), 2451–2465.
- 8) International Labour Organization (ILO). (2018). *Safety and health at the heart of the future of work*. ILO Publications.
- 9) Kumar, A., Singh, R., & Verma, P. (2020). IoT-based gas detection system using ESP32 and MQ sensors. *Journal of Sensors*, 2020, 1–10.
<https://doi.org/10.1155/2020/8821309>
- 10) Lee, S., Park, J., & Kim, H. (2022). Advances in IoT-based gas sensing technologies for industrial environments. *IEEE Sensors Journal*, 22(3), 456–467.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3132457>
- 11) Li, X., et al. (2021). Energy-efficient IoT architectures for real-time environmental monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), 3782–3794.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3029187>
- 12) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2019). *Criteria for a recommended standard: Working in confined spaces*. U.S. Department of Health and Human Services.
- 13) Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2023). *Permit-required confined spaces (29 CFR 1910.146)*. U.S. Department of Labor.
- 14) Rao, P., Kumar, N., & Reddy, K. (2019). Gas leakage detection and alerting system using IoT. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 8(5), 2278–0181.
- 15) Silva, J., Santos, R., & Pereira, F. (2021). Real-time notification in IoT systems using Telegram bots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Internet of Things*, 456–462.
<https://doi.org/10.1109/IoT52035.2021.00078>
- 16) Wang, Y., Li, J., & Zhang, L. (2018). Performance analysis of MQ series gas sensors under different environmental conditions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.08.123>
- 17) Zhang, D., et al. (2020). IoT-based intelligent safety monitoring system for industrial environments. *Journal of Industrial Information Integration*, 18, 100133.
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100133>