



Perbandingan Sensitivitas Serta Stabilitas MQ-4 dan MQ-5 Berbasis Arduino Untuk Deteksi Kebocoran Gas LPG

Yaaman Nazara*, Gogor Christmass Setyawan, Agustinus Rudatyo Himamunanto

Fakultas Sains dan Komputer, Program Studi Informatika, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta, Indonesia

Email: ^{1,*}yaaman.nazara@mail.ukrim.ac.id, ²masgogor@gmail.com, ³rudatyo@ukrim.ac.id

Email Penulis Korespondensi: yaamannazara@gmail.com

Abstrak—Kebocoran gas LPG merupakan ancaman keselamatan rumah tangga yang serius di Indonesia, di mana 88,59% rumah tangga menggunakan LPG sebagai bahan bakar memasak utama. Meskipun tidak berwarna dan berbau lemah pada konsentrasi rendah, sifatnya yang mudah terbakar berpotensi menimbulkan ledakan atau kebakaran apabila tidak terdeteksi secara dini. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja sensor MQ-4 dan MQ-5 dalam satu sistem deteksi kebocoran gas berbasis Arduino Uno. Metode yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif dengan perbandingan langsung pada kondisi identik di dalam *chamber* akrilik tertutup berukuran $16 \times 12 \times 10$ cm, menggunakan gas LPG dari korek api isi ulang sebagai simulasi kebocoran rumah tangga. Parameter yang diukur meliputi sensitivitas, didefinisikan sebagai *slope* kurva $\log(R_s/R_0)$ versus $\log(\text{ppm relatif})$, dan stabilitas pembacaan dari standar deviasi pengukuran berulang, dengan R_s sebagai resistansi sensor saat terpapar gas dan R_0 sebagai resistansi di udara bersih. Seluruh nilai ppm bersifat estimasi relatif berdasarkan *datasheet* resmi sensor. Hasil menunjukkan MQ-5 memiliki sensitivitas lebih tinggi dengan *slope* 0,7914 dibandingkan MQ-4 (0,6505), sedangkan MQ-4 lebih stabil dengan standar deviasi $\log_{10}(R_s/R_0)$ sebesar 0,656 dibandingkan MQ-5 (0,669). Sistem berhasil mendeteksi seluruh 30 skenario kebocoran (100%) tanpa *false alarm*, dengan tingkat keberhasilan klasifikasi 99,0% per sesi. Penelitian ini merekomendasikan MQ-5 untuk deteksi dini yang cepat dan MQ-4 untuk pemantauan jangka panjang yang memerlukan konsistensi data, sehingga keduanya berkontribusi sebagai bukti empiris komparatif solusi deteksi kebocoran gas rumah tangga yang sederhana, akurat, dan ekonomis.

Kata Kunci: Kebocoran Gas LPG; Sensor MQ-4; Sensor MQ-5; Arduino Uno; Sensitivitas dan Stabilitas Sensor

Abstract—LPG gas leakage is a serious household safety threat in Indonesia, where 88.59% of households use LPG as their primary cooking fuel. Although colorless and faintly odorous at low concentrations, its flammable nature can cause explosions or fires if undetected. This research aims to compare MQ-4 and MQ-5 sensor performance in a single Arduino Uno-based gas leakage detection system. A quantitative experiment with direct comparison was conducted under identical conditions inside a sealed acrylic *chamber* measuring $16 \times 12 \times 10$ cm, using LPG gas from a refillable lighter to simulate household leakage. Parameters measured include sensitivity, defined as the *slope* of the $\log(R_s/R_0)$ versus $\log(\text{relative ppm})$ curve, and reading stability from the standard deviation of repeated measurements, where R_s is sensor resistance when exposed to gas and R_0 is resistance in clean air. All ppm values are relative estimates based on official sensor *datasheets*. Results show MQ-5 has higher sensitivity with a *slope* of 0.7914 compared to MQ-4 (0.6505), while MQ-4 is more stable with a $\log_{10}(R_s/R_0)$ standard deviation of 0.656 compared to MQ-5 (0.669). The system successfully detected all 30 leakage scenarios (100%) without *false alarms*, with a classification success rate of 99.0% per session. This research recommends MQ-5 for rapid early detection and MQ-4 for long-term monitoring requiring data consistency, thus both contribute as empirical evidence for a simple, accurate, and economical gas leakage detection solution.

Keywords: LPG Gas Leakage; MQ-4 Sensor; MQ-5 Sensor; Arduino Uno; Sensor Sensitivity and Stability

1. PENDAHULUAN

Kebocoran gas LPG merupakan salah satu permasalahan keselamatan rumah tangga yang paling serius di Indonesia. Berdasarkan data (Badan Pusat Statistik, 2024) sebanyak 88,59% rumah tangga di Indonesia menggunakan gas LPG sebagai bahan bakar utama untuk memasak, menjadikan risiko kebocoran gas sebagai ancaman yang sangat luas dan merata di seluruh wilayah Indonesia. Gas LPG yang terdiri dari campuran propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) bersifat mudah terbakar, tidak berwarna, dan hanya memiliki bau yang dapat tercium saat konsentrasi sudah cukup tinggi. Kondisi ini sangat berbahaya karena kebocoran pada tahap awal sering tidak terdeteksi oleh indra manusia, terutama saat penghuni rumah sedang tidur atau tidak berada di lokasi. Sifat LPG yang mudah terbakar menjadikan kebocoran gas sebagai ancaman serius yang dapat memicu ledakan dan kebakaran permukiman, sehingga penggunaan yang tidak sesuai prosedur berpotensi menyebabkan kecelakaan, kerugian material, maupun korban jiwa. Oleh karena itu, keberadaan sistem deteksi kebocoran gas yang handal, sederhana, dan ekonomis menjadi kebutuhan mendesak, khususnya untuk lingkungan rumah tangga.

Permasalahan deteksi kebocoran gas LPG sangat relevan dengan bidang teknik informatika, khususnya dalam pengembangan sistem *embedded* berbasis mikrokontroler. Arduino Uno merupakan platform mikrokontroler yang banyak digunakan karena bersifat *open-source*, berbiaya rendah, dan mudah diintegrasikan dengan berbagai sensor analog maupun digital. Dalam sistem deteksi gas, Arduino berperan sebagai pengolah sinyal analog dari sensor resistif seri MQ, yang menghasilkan perubahan tegangan sebanding dengan konsentrasi gas di udara. Pemilihan jenis sensor yang tepat menjadi faktor kritis, karena setiap varian sensor MQ memiliki karakteristik sensitivitas dan selektivitas yang berbeda terhadap jenis gas tertentu. Dua sensor yang paling relevan untuk aplikasi deteksi LPG rumah tangga adalah MQ-4 dan MQ-5. Sensor MQ-4 dirancang dengan spesialisasi tinggi untuk mendeteksi metana (CH_4) dan gas hidrokarbon rantai pendek, yang merupakan komponen utama gas alam dan juga hadir dalam campuran LPG. Sementara itu, sensor MQ-5 secara khusus dirancang untuk mendeteksi LPG dan butana (C_4H_{10}), menjadikannya kandidat yang secara teknis paling sesuai untuk aplikasi deteksi kebocoran gas rumah tangga berbasis LPG. Meskipun keduanya sering disebut dalam literatur sebagai sensor yang relevan untuk gas hidrokarbon, belum ada penelitian yang



secara langsung dan terukur membandingkan kinerja kedua sensor ini dalam satu sistem identik, sehingga rekomendasi pemilihan sensor yang objektif dan berbasis data masih belum tersedia.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem deteksi kebocoran gas LPG berbasis Arduino. (Eviolina et al., 2025) merancang sistem deteksi kebocoran LPG menggunakan sensor MQ-2 dengan Arduino Uno, dilengkapi *solenoid valve* dan *buzzer*, yang terbukti mampu mendeteksi kebocoran di atas 600 ppm dan secara otomatis memutus aliran gas. (Az Zahro & Rahmadewi, 2023) serta (Baskoro et al., 2023) mengintegrasikan sensor MQ-5 dengan Arduino Uno untuk mendeteksi kebocoran LPG secara *real-time* melalui *buzzer* dan LED dengan respons yang cepat. (Prasetyo & Paramytha, 2023) mengembangkan sistem deteksi LPG berbasis IoT menggunakan MQ-5 dan membuktikan tegangan *output* mencapai 3,2 V saat paparan gas, mengonfirmasi kemampuan MQ-5 dalam mendeteksi LPG di lingkungan domestik. (Pravda & Kurniawan, 2025) merancang dan mengimplementasikan sistem prototipe pemantauan kebocoran gas LPG berbasis mikrokontroler ESP8266 menggunakan sensor MQ-5 dan DHT11 dengan metode logika fuzzy Mamdani, yang mampu mendeteksi kebocoran gas dengan akurasi 100% berdasarkan 25 skenario pengujian serta mengirimkan notifikasi peringatan dini secara lokal maupun jarak jauh dengan rata-rata waktu pengiriman ± 5 detik.

Pada aspek karakterisasi dan perbandingan sensor, (Galceran et al., 2023) membandingkan sensor MQ-2 dan MQ-6 secara kuantitatif menggunakan *Independent Samples T-Test* dan menemukan bahwa MQ-6 menghasilkan nilai ppm lebih tinggi ($p < 0,05$) serta merekomendasikan jarak optimal sensor 20–40 cm dari sumber gas. (Mukhtarov et al., 2024) membandingkan karakteristik teknis sensor MQ-2 dan MQ-4 dan menyimpulkan bahwa MQ-4 lebih spesifik untuk mendeteksi metana dan gas alam dibandingkan MQ-2 yang bersifat lebih umum. (Kiran et al., 2024) mengembangkan kurva kalibrasi untuk sensor MQ-5 menggunakan prosedur preheating 24 jam sebelum pengambilan data guna memperoleh pembacaan yang stabil dan akurat (Ekah et al., 2024) melalui tinjauan sistematis menyimpulkan bahwa MQ-4 dan MQ-5 memiliki spesialisasi masing-masing untuk metana dan LPG, namun performanya sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan memerlukan kalibrasi berkala. (Cipta Lismana et al., 2025) mengonfirmasi keandalan MQ-4 pada sistem biogas berbasis Arduino Uno dengan tingkat kesalahan rata-rata hanya 2%. (Khakim et al., 2022) menunjukkan bahwa MQ-5 memiliki sensitivitas tinggi terhadap LPG dan butana. (Ramadhani et al., 2024) melakukan karakterisasi MQ-4 dan menemukan kesalahan relatif rata-rata hanya 0,066% dalam pengukuran konsentrasi metana, mengonfirmasi keandalan sensor MQ-4 untuk aplikasi monitoring gas berbasis mikrokontroler.

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan fondasi yang kuat, terdapat celah penelitian (*research gap*) yang signifikan dan belum terjawab. Berdasarkan penelusuran literatur yang dilakukan, belum ditemukan penelitian yang secara langsung menempatkan sensor MQ-4 dan MQ-5 dalam satu sistem identik untuk dibandingkan pada kondisi paparan gas LPG yang sama. Mayoritas studi hanya menggunakan satu jenis sensor atau membandingkan sensor dari kategori yang berbeda, misalnya MQ-2 versus MQ-6 atau MQ-2 versus MQ-4. Selain itu, penelitian yang ada umumnya hanya mengukur waktu respons, nilai tegangan mentah, atau konsentrasi ppm secara absolut tanpa menggunakan metrik sensitivitas yang terstandarisasi. Rasio R_s/R_0 yang diolah melalui kemiringan (*slope*) kurva log-log merupakan metrik yang lebih objektif dan terstandarisasi untuk mengkuantifikasi sensitivitas sensor, namun pendekatan ini belum banyak dilaporkan secara komparatif antara MQ-4 dan MQ-5. Di samping itu, stabilitas pembacaan yang diukur melalui standar deviasi data berulang belum pernah dianalisis secara terintegrasi bersama parameter sensitivitas dalam satu kerangka pengujian yang terkontrol untuk kedua sensor tersebut. Akibatnya, rekomendasi pemilihan sensor antara MQ-4 dan MQ-5 untuk sistem deteksi kebocoran LPG rumah tangga masih bersifat subjektif dan tidak berbasis data komparatif yang terukur.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan sensitivitas dan stabilitas sensor MQ-4 dan MQ-5 dalam sistem deteksi kebocoran gas LPG berbasis Arduino Uno, guna menghasilkan rekomendasi pemilihan sensor yang objektif, terukur, dan berbasis data komparatif. Penelitian ini hadir untuk menjawab celah tersebut dengan mengusulkan pendekatan eksperimen kuantitatif komparatif yang menempatkan sensor MQ-4 dan MQ-5 secara bersamaan dalam satu sistem deteksi kebocoran gas berbasis Arduino Uno. Pemilihan MQ-4 didasarkan pada karakteristik teknis sensor tersebut yang terspesialisasi untuk mendeteksi metana dan hidrokarbon rantai pendek, yang secara kimiawi hadir dalam komposisi LPG. Pemilihan MQ-5 didasarkan pada spesifikasi pabrikan yang menyatakan sensor ini dioptimalkan untuk LPG dan butana, menjadikannya kandidat paling relevan secara teknis untuk aplikasi ini. Kedua sensor diuji pada kondisi paparan gas LPG yang identik di dalam *chamber* tertutup menggunakan gas dari korek api isi ulang sebagai sumber simulasi kebocoran rumah tangga. Parameter utama yang dianalisis meliputi sensitivitas, yang dikuantifikasi melalui *slope* kurva $\log(R_s/R_0)$ terhadap $\log(\text{ppm})$ sebagai metrik terstandarisasi, dan stabilitas pembacaan, yang dinilai melalui standar deviasi pengukuran berulang pada kondisi yang sama. Pendekatan ini tidak mengklaim pengukuran konsentrasi absolut, melainkan berfokus pada estimasi relatif berbasis rasio R_s/R_0 yang lebih andal dan *reproducible*. Dengan desain eksperimen ini, penelitian ini berkontribusi dalam menyediakan bukti empiris komparatif yang dapat dijadikan dasar pemilihan sensor MQ-4 atau MQ-5 secara objektif dan terukur untuk pengembangan sistem peringatan dini kebocoran gas LPG rumah tangga yang sederhana, akurat, dan ekonomis.

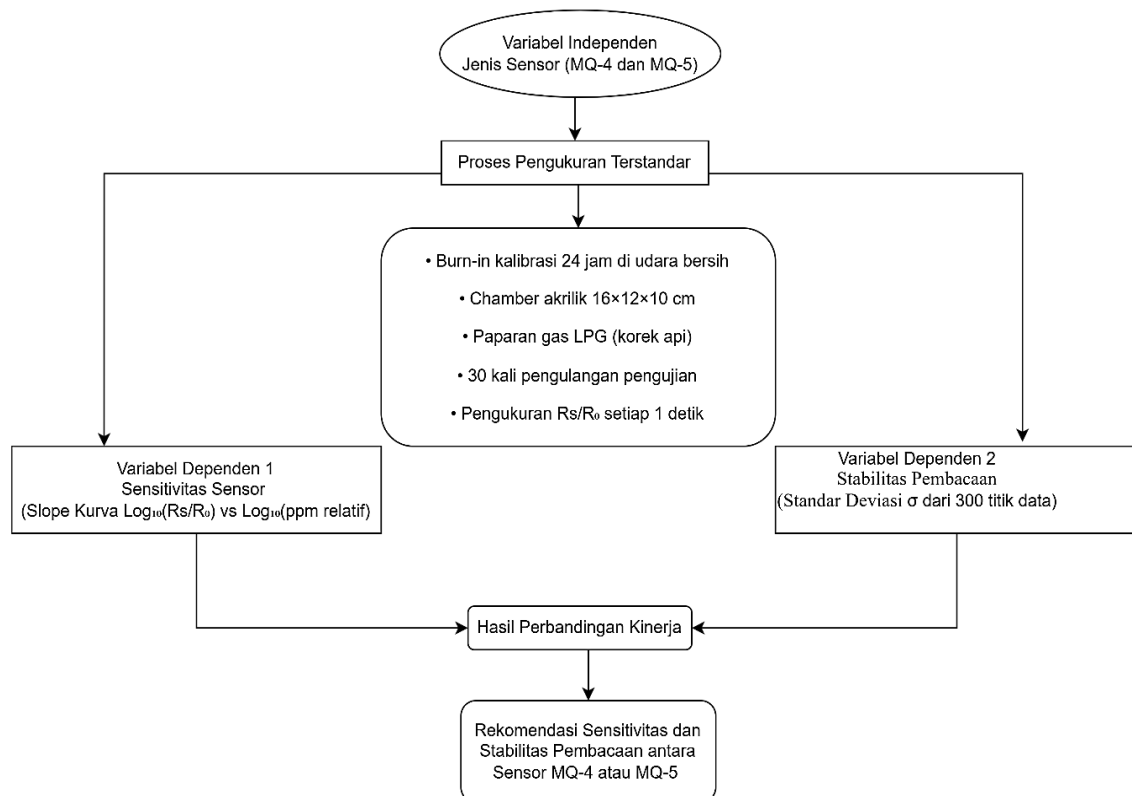
2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Kerangka Dasar Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam jenis penelitian rekayasa (*engineering research*) yang berfokus pada pengembangan prototipe sistem deteksi gas berbasis mikrokontroler. Metode yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif dengan pendekatan perbandingan langsung untuk menguji dan membandingkan kinerja dua sensor gas, yaitu sensor MQ-4 dan MQ-5, yang diintegrasikan dalam satu sistem deteksi kebocoran gas berbasis Arduino Uno. Pendekatan perbandingan langsung dipilih karena memungkinkan pengujian kedua sensor pada kondisi lingkungan yang identik secara bersamaan, sehingga perbedaan sensitivitas dan stabilitas pembacaan dapat dianalisis secara objektif dan terukur (Galceran et al., 2023).

Variabel independen dalam penelitian ini adalah jenis sensor yang digunakan, yaitu sensor MQ-4 dan sensor MQ-5. Sementara itu, variabel dependen adalah kinerja sistem yang diukur berdasarkan dua parameter utama: (1) sensitivitas, yang didefinisikan sebagai kemiringan (*slope*) kurva logaritmik $\log(R_s/R_0)$ versus $\log(\text{ppm relatif})$; dan (2) stabilitas pembacaan, yang diukur menggunakan standar deviasi (σ) dari hasil pengukuran berulang. Pengujian dilakukan di dalam *chamber* akrilik tertutup berukuran 16 cm × 12 cm × 10 cm untuk memperoleh hasil pengujian yang lebih konsisten dan terkontrol (Sumaedi et al., 2024).

Hipotesis penelitian ini adalah MQ-5 memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap gas LPG, sedangkan MQ-4 memiliki stabilitas pembacaan yang lebih baik. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui pengujian langsung terhadap prototipe sistem, dengan data berupa tegangan keluaran analog sensor yang selanjutnya dikonversi menjadi nilai resistansi sensor (R_s), rasio R_s/R_0 , dan estimasi konsentrasi gas dalam satuan ppm relatif. Analisis statistik dilakukan menggunakan uji-t dua sampel independen dengan asumsi varians tidak sama (Welch's t-test) pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, konsisten dengan pendekatan yang diterapkan pada perbandingan sensor gas serupa (Galceran et al., 2023). Kerangka pemikiran penelitian ini disajikan pada Gambar 1.

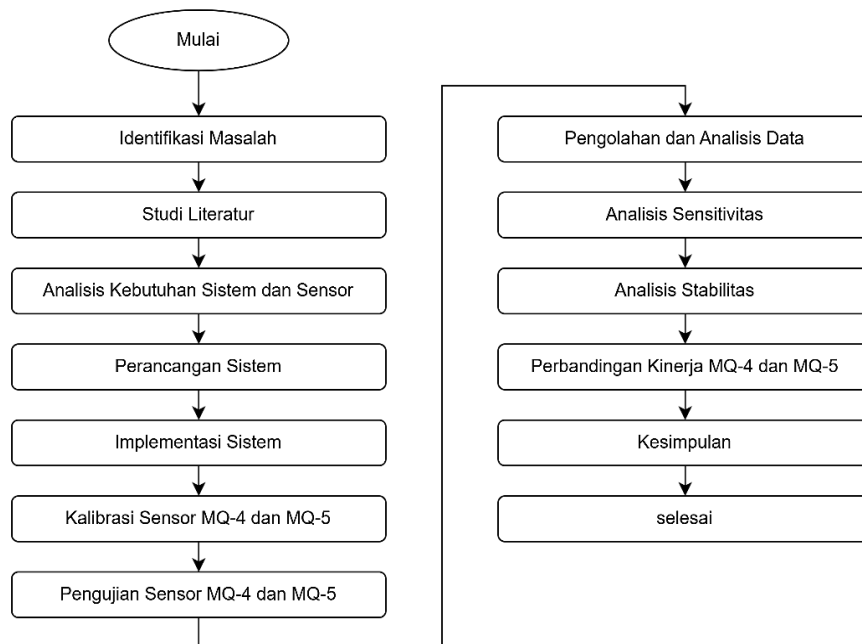


Gambar 1. Kerangka Pemikiran Penelitian

Kerangka Gambar 1 pemikiran penelitian ini mengilustrasikan hubungan antara variabel independen, yaitu jenis sensor (MQ-4 dan MQ-5), dengan dua variabel dependen utama. Variabel dependen pertama adalah sensitivitas sensor yang diukur melalui *slope* kurva $\log_{10}(R_s/R_0)$ versus $\log_{10}(\text{ppm relatif})$. Sedangkan variabel dependen kedua adalah stabilitas pembacaan yang diukur menggunakan standar deviasi (σ) dari 300 data. Kedua variabel dependen tersebut diperoleh melalui proses pengukuran terstandar yang mencakup *burn-in* kalibrasi selama 24 jam di udara bersih, penggunaan *chamber* akrilik berukuran 16×12×10 cm, paparan gas LPG (korek api), serta 30 kali pengulangan pengujian. Hasil analisis kedua parameter ini selanjutnya digunakan untuk membandingkan kinerja sensor dan memberikan rekomendasi sensor yang paling optimal dalam hal sensitivitas dan stabilitas untuk sistem deteksi kebocoran gas LPG berbasis Arduino Uno.

2.2 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui dua belas tahapan sistematis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 Flowchart Penelitian. Berikut adalah penjelasan dari setiap tahapan yang dilaksanakan.



Gambar 2. Alur Tahapan Penelitian

Gambar 2 menampilkan *flowchart* alur penelitian yang menggambarkan keseluruhan tahapan secara sistematis. Proses penelitian dimulai dari identifikasi masalah terkait urgensi sistem deteksi kebocoran gas LPG di lingkungan rumah tangga, dilanjutkan dengan studi literatur untuk membangun landasan teoretis yang kuat. Selanjutnya dilakukan analisis kebutuhan sistem untuk menentukan komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan. Tahapan kemudian berlanjut ke perancangan sistem yang mencakup blok diagram dan *flowchart* cara kerja. Setelah implementasi fisik selesai, dilakukan kalibrasi sensor melalui proses *burn-in* selama 24 jam di udara bersih untuk memperoleh nilai *baseline* R_0 . Pengujian sensor dilaksanakan menggunakan gas LPG di dalam *chamber* akrilik tertutup berukuran 16 cm × 12 cm × 10 cm sebanyak 30 kali pengulangan. Hasil pengujian kemudian diolah melalui tahap pengolahan data, analisis sensitivitas, analisis stabilitas, dan perbandingan kinerja secara statistik. Proses diakhiri dengan penarikan kesimpulan mengenai sensor yang paling optimal untuk sistem deteksi kebocoran gas rumah tangga (Laitera et al., 2022).

a. Tahap 1: Identifikasi Masalah

Tahap pertama adalah identifikasi masalah yang bertujuan menentukan urgensi dan relevansi penelitian. Pada tahap ini dilakukan kajian awal mengenai permasalahan kebocoran gas LPG sebagai ancaman keselamatan rumah tangga di Indonesia. Dari identifikasi ini ditetapkan bahwa parameter evaluasi yang relevan adalah sensitivitas dan stabilitas pembacaan sensor, karena kedua parameter tersebut secara langsung menentukan efektivitas sistem deteksi dini kebocoran gas.

b. Tahap 2: Studi Literatur

Tahap studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan referensi ilmiah yang relevan, meliputi karakteristik teknis sensor MQ-4 dan MQ-5 berdasarkan *datasheet* resmi, teknik kalibrasi sensor gas, serta metode pengujian sistem deteksi gas berbasis mikrokontroler Arduino. Penelitian-penelitian terdahulu dikaji secara mendalam untuk membangun landasan teoretis yang kuat dan mengidentifikasi celah penelitian yang belum terpenuhi (Fauzi & Sukarno, 2025).

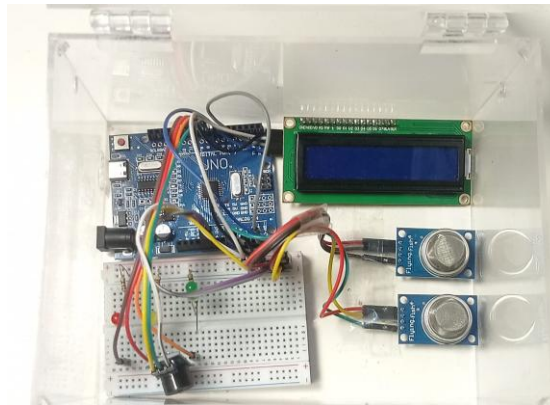
c. Tahap 3: Analisis Kebutuhan Sistem

Pada tahap ini ditentukan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak yang dibutuhkan. Perangkat keras meliputi mikrokontroler Arduino Uno R3 sebagai unit pemroses utama, sensor MQ-4 dan MQ-5 sebagai elemen pendeteksi gas, modul LCD 16×2 untuk visualisasi data secara *real-time*, tiga buah LED indikator (hijau, kuning, merah), *buzzer* sebagai alarm akustik, *breadboard* dan kabel penghubung, serta *chamber* akrilik tertutup berukuran 16 cm × 12 cm × 10 cm sebagai ruang uji terkontrol. Perangkat lunak yang digunakan adalah Arduino IDE untuk pemrograman mikrokontroler dan Microsoft Excel dengan modul *Analysis ToolPak* untuk pengolahan dan analisis data.

d. Tahap 4: Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem mencakup penyusunan konfigurasi perangkat keras pada prototipe sistem deteksi kebocoran gas LPG. Sistem dirancang menggunakan Arduino Uno R3 sebagai unit pemroses utama yang terhubung

dengan sensor MQ-4 dan MQ-5 sebagai elemen pendeteksi gas. Modul LCD 16×2 digunakan untuk menampilkan informasi hasil pembacaan sensor, sedangkan LED tiga warna berfungsi sebagai indikator status sistem, yaitu LED hijau untuk kondisi aman, LED kuning untuk kondisi waspada, dan LED merah untuk kondisi bahaya, dengan *buzzer* sebagai alarm peringatan. Seluruh komponen dirangkai menggunakan *breadboard* dan kabel penghubung, serta ditempatkan di dalam *chamber* akrilik tertutup berukuran 16 cm × 12 cm × 10 cm sebagai ruang uji terkontrol. Konfigurasi sistem ditunjukkan pada Gambar 3.

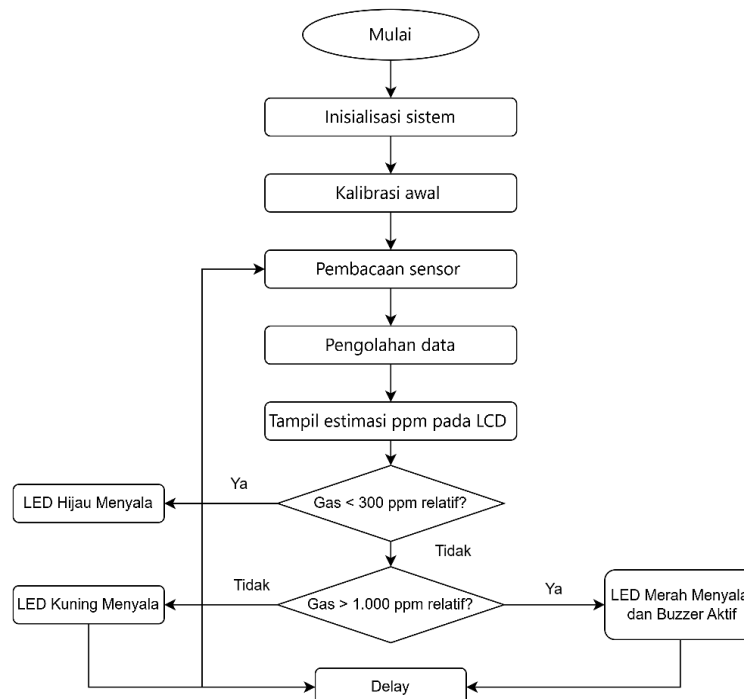


Gambar 3. Konfigurasi Sistem Deteksi Kebocoran Gas LPG

Gambar 3 menunjukkan hasil perancangan sistem deteksi kebocoran gas LPG yang telah dirakit pada *breadboard* dengan Arduino Uno R3 sebagai unit pemroses utama, sensor MQ-4 dan MQ-5 sebagai elemen pendeteksi gas, LCD 16×2 sebagai penampil informasi, serta LED indikator dan buzzer sebagai output peringatan, seluruhnya ditempatkan di dalam *chamber* akrilik tertutup sebagai ruang uji.

e. Tahap 5: Implementasi Sistem

Pada tahap ini seluruh komponen dirangkai pada *breadboard* sesuai skema yang telah dirancang. Sensor MQ-4 dan MQ-5 dihubungkan ke pin masukan analog Arduino Uno R3 untuk membaca konsentrasi gas, modul LCD 16×2 dihubungkan melalui antarmuka komunikasi I2C, serta LED tiga warna dan buzzer dihubungkan ke pin keluaran digital Arduino dengan resistor pembatas arus yang sesuai. Seluruh komponen memperoleh catu daya dari pin 5V dan GND Arduino Uno, kemudian program kendali sistem ditulis menggunakan Arduino IDE dan diunggah ke mikrokontroler. Cara kerja sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Cara Kerja Sistem

Berdasarkan Gambar 4, sistem bekerja dimulai dari inisialisasi dan kalibrasi awal, dilanjutkan dengan pembacaan konsentrasi gas secara kontinu oleh sensor MQ-4 dan MQ-5. Data hasil pembacaan diproses oleh Arduino Uno dan ditampilkan pada LCD 16×2 dalam bentuk estimasi konsentrasi gas relatif (ppm relatif). Sistem



selanjutnya membandingkan nilai tersebut dengan ambang batas yang telah ditentukan: apabila konsentrasi gas kurang dari 300 ppm relatif, LED hijau menyala menandakan kondisi aman; apabila konsentrasi berada pada rentang 300–1.000 ppm relatif, LED kuning aktif sebagai indikator waspada; dan apabila konsentrasi melebihi 1.000 ppm relatif, LED merah menyala disertai buzzer aktif sebagai alarm peringatan bahaya. Setelah setiap siklus pembacaan, sistem memberikan jeda (*delay*) sebelum kembali melakukan pembacaan sensor berikutnya secara berulang.

f. Tahap 6: Kalibrasi Sensor

Sebelum pengambilan data, kedua sensor menjalani proses *burn-in* selama 24 jam di udara bersih untuk mencapai kondisi operasional yang stabil dan meminimalkan *drift* awal. Meskipun *datasheet* (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2024; 2021) merekomendasikan waktu pemanasan lebih dari 48 jam, durasi 24 jam diterapkan dalam penelitian ini sebagai penyesuaian terhadap keterbatasan waktu eksperimen, dengan tetap mengacu pada prinsip kalibrasi *baseline* R_0 yang tercantum dalam *datasheet* tersebut. Proses ini menghasilkan nilai resistansi sensor di udara bersih (R_0) yang selanjutnya digunakan sebagai *baseline* kalibrasi untuk menghitung rasio R_s/R_0 saat sensor terpapar gas.

g. Tahap 7: Pengujian Sensor

Pengujian dilakukan di dalam *chamber* akrilik tertutup berukuran 16 cm × 12 cm × 10 cm menggunakan gas LPG dari korek api isi ulang sebagai simulasi kebocoran gas rumah tangga. Ukuran *chamber* yang relatif kecil dipilih karena memungkinkan konsentrasi gas uji meningkat secara merata dan cepat, sehingga respons sensor MQ-4 dan MQ-5 dapat diamati dengan lebih jelas dan konsisten. Paparan gas dilakukan dengan metode injeksi singkat selama 1–3 detik. Pengujian diulang sebanyak 30 kali untuk memastikan keandalan dan konsistensi data.

h. Tahap 8: Pengolahan Data

Data mentah berupa tegangan keluaran analog yang direkam melalui *Serial Monitor* Arduino IDE setiap 1 detik selama 5 menit per sesi (total 300 data per sesi) diolah menggunakan Microsoft Excel. Tahapan pengolahan meliputi konversi tegangan keluaran analog menjadi nilai resistansi sensor (R_s) menggunakan persamaan (1) dan perhitungan rasio R_s/R_0 menggunakan persamaan (2). Data kemudian ditransformasikan ke dalam skala logaritmik untuk keperluan analisis sensitivitas.

2.3 Rumus Penelitian

Rumus-rumus yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari *datasheet* resmi sensor MQ-4 dan MQ-5 serta referensi metode analisis sensor gas yang telah tervalidasi. Berikut adalah persamaan matematika yang digunakan dalam proses pengolahan dan analisis data.

2.3.1 Resistansi Sensor (R_s)

Resistansi sensor (R_s) dihitung dari tegangan keluaran analog (V_{out}) menggunakan persamaan berikut:

$$R_s = \frac{5 \times RL}{V_{out}} - RL \quad (1)$$

Dimana R_s adalah resistansi sensor (Ω), RL adalah resistansi beban yang dipasang pada modul sensor ($k\Omega$), dan V_{out} adalah tegangan keluaran analog yang dibaca oleh pin ADC Arduino Uno (V).

2.3.2 Rasio Resistansi Sensor

Rasio hambatan sensor terhadap kondisi udara bersih dihitung dengan persamaan:

$$\frac{R_s}{R_0} \quad (2)$$

Dimana R_0 adalah resistansi sensor pada kondisi udara bersih yang diperoleh melalui proses kalibrasi *burn-in* selama 24 jam. Rasio R_s/R_0 merupakan parameter normalisasi yang digunakan untuk meminimalkan variasi antar unit sensor dan sebagai dasar estimasi konsentrasi gas.

2.3.3 Estimasi Konsentrasi Gas (ppm)

Estimasi konsentrasi gas dalam satuan ppm diperoleh menggunakan pendekatan hukum pangkat (*power law*) berdasarkan kurva sensitivitas pada *datasheet* resmi sensor:

$$PPM = a \times \left(\frac{R_s}{R_0}\right)^b \quad (3)$$

Dimana konstanta a dan b diperoleh dari kurva sensitivitas pada Figure 3 *datasheet* resmi Winsen MQ-4 v1.7 dan MQ-5 v1.6 (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2024; 2021) dengan nilai $a = 570$ dan $b = -2,36$ untuk sensor MQ-4, serta $a = 700$ dan $b = -2,22$ untuk sensor MQ-5 terhadap gas LPG (C_3H_8). Seluruh nilai konsentrasi yang diperoleh bersifat estimasi relatif berdasarkan karakteristik respons sensor sesuai *datasheet*, bukan pengukuran absolut; nilai di luar rentang kurva *datasheet* merupakan ekstrapolasi dan tidak diinterpretasikan sebagai konsentrasi aktual.

2.3.4 Sensitivitas Sensor (*Slope*)

Sensitivitas sensor dianalisis dari kemiringan (*slope*) kurva logaritmik $\log(R_s/R_0)$ versus $\log(\text{ppm relatif})$ melalui regresi linear pada skala log-log:



$$slope = \frac{\Delta \log\left(\frac{R_s}{R_0}\right)}{\Delta \log(ppm)} \quad (4)$$

Nilai *slope* yang lebih tinggi mengindikasikan perubahan resistansi yang lebih besar terhadap setiap kenaikan konsentrasi gas, yang berarti sensor memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap gas target.

2.3.5 Stabilitas Pembacaan (Standar Deviasi)

Stabilitas pembacaan diukur menggunakan standar deviasi (σ) dari hasil pengukuran berulang:

$$\sigma = \sqrt{\left[\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}\right]} \quad (5)$$

Dimana x_i adalah nilai pengukuran ke- i , \bar{x} adalah nilai rata-rata pengukuran, dan n adalah jumlah total data. Nilai standar deviasi yang lebih rendah mengindikasikan konsistensi pembacaan sensor yang lebih baik.

2.4 Pengukuran Kinerja dan Analisis Sistem

Evaluasi kinerja sistem deteksi dilakukan secara kuantitatif untuk mengukur tingkat efisiensi dan keandalan sensor MQ-4 dan MQ-5 dalam kondisi pengujian yang identik. Parameter kinerja yang diamati meliputi tiga aspek utama, yaitu sensitivitas, stabilitas, dan keberhasilan sistem secara fungsional.

Sensitivitas dievaluasi melalui kemiringan (*slope*) kurva $\log(R_s/R_0)$ versus $\log(ppm)$ relatif yang diperoleh dari regresi linear pada skala logaritmik. Semakin besar nilai *slope*, semakin sensitif sensor terhadap perubahan konsentrasi gas LPG. Stabilitas pembacaan dievaluasi melalui standar deviasi (σ) dari 300 data per sesi $\log(R_s/R_0)$ dalam satu sesi pengujian representatif yang dipilih dari 30 pengulangan. Nilai σ yang lebih rendah menunjukkan konsistensi dan keandalan sensor yang lebih tinggi untuk pemantauan berkelanjutan. Keberhasilan sistem secara fungsional dievaluasi berdasarkan persentase keberhasilan aktivasi alarm indikator (LED tiga warna dan *buzzer*) ketika konsentrasi gas melebihi ambang batas yang telah diprogram, serta tidak adanya *false alarm* pada kondisi udara bersih.

Data hasil pengujian seluruhnya diolah secara kuantitatif menggunakan Microsoft Excel dengan modul *Analysis ToolPak*. Data yang dianalisis dipilih dari satu sesi pengujian yang paling representatif, yaitu sesi yang menunjukkan pola respons paling seragam di antara seluruh 30 pengulangan; pemilihan ini valid karena seluruh 30 sesi dilaksanakan dalam kondisi identik, sehingga satu sesi representatif sudah mencukupi untuk mencerminkan karakteristik intrinsik masing-masing sensor. Pengujian signifikansi perbedaan rata-rata R_s/R_0 antara kedua sensor diterapkan dengan asumsi varians tidak sama (*Welch's t-test*), dan interpretasi hasil mengacu pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian eksperimental dan analisis kuantitatif kinerja sistem deteksi kebocoran gas LPG berbasis Arduino Uno menggunakan sensor MQ-4 dan MQ-5. Pengujian dilaksanakan melalui tahapan yang terstandarisasi, meliputi kalibrasi *burn-in* 24 jam, paparan gas LPG di dalam *chamber* akrilik tertutup berukuran $16 \times 12 \times 10$ cm (volume 1.920 cm³), dan perekaman data kontinu selama 5 menit per sesi sebanyak 300 data pada interval 1 detik per data. Seluruh nilai ppm yang dilaporkan merupakan estimasi relatif berbasis ekstrapolasi kurva *power-law* dari *datasheet* resmi sensor, bukan pengukuran konsentrasi absolut di udara terbuka. Perbedaan estimasi ppm antara kedua sensor pada waktu paparan yang sama sepenuhnya mencerminkan perbedaan konstanta *power-law* (a dan b) masing-masing *datasheet*; parameter utama perbandingan kinerja adalah nilai R_s/R_0 dan *slope* kurva log-log, bukan nilai ppm absolut.

3.1 Hasil Pengujian Respons Sensor dan Kinerja Sistem

Sebelum pengambilan data, kedua sensor menjalani proses kalibrasi *burn-in* selama 24 jam di udara bersih untuk menstabilkan elemen pemanas internal dan meminimalkan drift awal. Proses ini menghasilkan nilai R_0 yang ditetapkan sebagai baseline kalibrasi. Hasil kalibrasi menunjukkan nilai R_s/R_0 di udara bersih sebesar 4,36 untuk sensor MQ-4 dan 6,38 untuk sensor MQ-5. Durasi *burn-in* 24 jam ini dilakukan mengacu pada praktik umum yang disebutkan dalam *datasheet* Winsen Electronics dan disesuaikan dengan kondisi serta keterbatasan waktu eksperimen penelitian ini.

Pada fase pengujian respons, sistem berhasil mengklasifikasikan tiga kategori konsentrasi gas berdasarkan logika ambang batas yang telah diprogram, yaitu aman (< 300 ppm relatif), waspada (300–1.000 ppm relatif), dan bahaya (> 1.000 ppm relatif). Selama 30 sesi pengujian, indikator sistem bekerja sesuai logika yang diprogram pada seluruh skenario: LED hijau aktif pada kondisi aman, LED kuning menyala pada kondisi waspada, dan LED merah disertai *buzzer* aktif pada kondisi bahaya. Tidak ditemukan *false alarm* pada kondisi udara bersih di seluruh sesi pengujian. Hasil ini sejalan dengan (Pravda & Kurniawan, 2025), yang melaporkan akurasi deteksi 100% pada 25 skenario pengujian sistem kebocoran gas berbasis MQ-5.

Dari 300 data dalam satu sesi representatif, terdapat 3 data per sensor (1,0%) yang berada pada fase transisi difusi gas, yakni pada batas perpindahan kategori aman ke waspada atau waspada ke bahaya. Ketiga data tersebut bukan kegagalan deteksi, melainkan variasi alami akibat metode injeksi singkat 1–3 detik yang menghasilkan gradien



konsentrasi sesaat. Secara fungsional, seluruh 30 skenario kebocoran berhasil dideteksi tanpa pengecualian. Hasil pengujian fungsional sistem dirangkum pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil Pengujian Fungsional Sistem

Parameter Pengujian	Hasil
Total sesi pengujian	30 sesi
Deteksi kebocoran berhasil	30/30 sesi (100%)
<i>False alarm</i> pada kondisi udara bersih	0% dari 30 pengujian
Total data per sesi	300 data (1 data/detik, 5 menit)
Data terklasifikasi tepat (MQ-4)	297/300 data (99,0%)
Data terklasifikasi tepat (MQ-5)	297/300 data (99,0%)
Data pada fase transisi difusi gas	3 data per sensor (1,0%)
Tingkat keberhasilan deteksi skenario	100% (30/30 skenario terdeteksi)

Berdasarkan Tabel 1, sistem deteksi berhasil mendeteksi kebocoran gas pada seluruh 30 sesi pengujian (100%) tanpa satu pun *false alarm* pada kondisi udara bersih. Analisis data kuantitatif dilakukan pada satu sesi pengujian yang paling representatif dari 30 sesi, yaitu sesi yang menunjukkan pola respons paling seragam, dengan total 300 data pengukuran pada interval 1 detik selama 5 menit; pemilihan satu sesi representatif ini bertujuan memastikan perbandingan dilakukan dalam kondisi paparan gas yang paling terkontrol sebagaimana dijelaskan pada Sub-bab 2.4. Dari 300 data pengukuran tersebut, sebanyak 297 data (99,0%) pada masing-masing sensor MQ-4 dan MQ-5 menghasilkan klasifikasi kategori yang sesuai dengan logika ambang batas sistem (aman, waspada, atau bahaya). Adapun 3 data yang tersisa (1,0%) berada pada fase transisi difusi gas, yaitu kondisi sesaat ketika konsentrasi gas berpindah antar kategori akibat metode injeksi singkat 1–3 detik yang menghasilkan gradien konsentrasi tidak seragam di dalam chamber. Kondisi transisi ini tidak dikategorikan sebagai kegagalan deteksi karena secara fungsional seluruh 30 skenario kebocoran tetap terdeteksi tanpa pengecualian.

Respons sensor terhadap paparan gas LPG menunjukkan pola penurunan nilai R_s/R_0 yang konsisten seiring meningkatnya konsentrasi gas di dalam *chamber*. Penurunan resistansi ini merupakan karakteristik dasar sensor semikonduktor tipe MQ yang bekerja berdasarkan prinsip adsorpsi gas pada permukaan lapisan sensitif oksida logam (Ekah et al., 2024). Nilai R_s/R_0 pada data representatif steady-state masing-masing kategori konsentrasi disajikan pada Tabel 2 untuk sensor MQ-4 dan Tabel 3 untuk sensor MQ-5.

Tabel 2. Nilai R_s/R_0 pada Berbagai Kategori Konsentrasi Gas (Sensor MQ-4)

Kategori Konsentrasi	Estimasi PPM Relatif	Nilai R_s/R_0 (Data Steady-State)
Aman (< 300 ppm relatif)	212,5	1,51
Waspada (300–1.000 ppm relatif)	518,4	1,04
Bahaya (> 1.000 ppm relatif)	1.538,8	0,65

Tabel 3. Nilai R_s/R_0 pada Berbagai Kategori Konsentrasi Gas (Sensor MQ-5)

Kategori Konsentrasi	Estimasi PPM Relatif	Nilai R_s/R_0 (Data Steady-State)
Aman (< 300 ppm relatif)	213,6	1,70
Waspada (300–1.000 ppm relatif)	517,7	1,14
Bahaya (> 1.000 ppm relatif)	1.040,4	0,83

Berdasarkan Tabel 2, sensor MQ-4 menunjukkan nilai R_s/R_0 sebesar 1,51 pada kategori aman (estimasi 212,5 ppm relatif), turun menjadi 1,04 pada kategori waspada (estimasi 518,4 ppm relatif), dan mencapai 0,65 pada kategori bahaya (estimasi 1.538,8 ppm relatif). Berdasarkan Tabel 3, sensor MQ-5 mencatatkan nilai R_s/R_0 sebesar 1,70 pada kategori aman (estimasi 213,6 ppm relatif), turun menjadi 1,14 pada kategori waspada (estimasi 517,7 ppm relatif), dan mencapai 0,83 pada kategori bahaya (estimasi 1.040,4 ppm relatif). Nilai $R_s/R_0 > 1,00$ pada kategori aman dan waspada mencerminkan karakteristik tipikal sensor semikonduktor oksida logam pada fase akumulasi gas awal di dalam *chamber* tertutup, di mana gas belum terdistribusi merata ke seluruh permukaan aktif lapisan SnO_2 sehingga adsorpsi molekul gas belum mencapai kejenuhan. Kondisi ini konsisten dengan mekanisme kerja sensor MQ yang dilaporkan dalam literatur, di mana penurunan R_s/R_0 yang signifikan baru terjadi setelah konsentrasi gas melampaui ambang adsorpsi efektif (Ekah et al., 2024). Threshold sistem (300 ppm dan 1.000 ppm) ditetapkan berdasarkan pola kurva karakteristik *datasheet*, bukan berdasarkan data $R_s/R_0 = 1,00$, sehingga klasifikasi kategori tetap valid secara fungsional. Pada kondisi bahaya, nilai R_s/R_0 turun di bawah 1,00 pada kedua sensor (MQ-4 = 0,65; MQ-5 = 0,83), yang mengkonfirmasi respons adsorpsi yang kuat terhadap akumulasi gas LPG. Perbedaan rentang operasional antar sensor MQ mencerminkan karakteristik intrinsik lapisan sensitif sesuai spesifikasi pabrikan masing-masing (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2024; 2021; Mukhtarov et al., 2024).

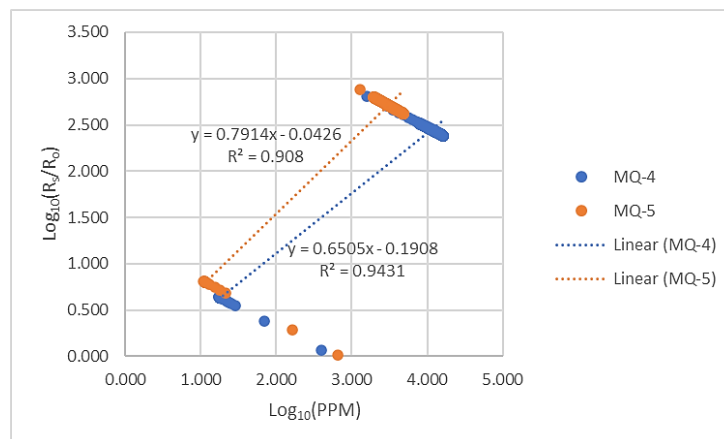
3.2 Analisis Kuantitatif Sensitivitas, Stabilitas, dan Validasi Statistik

3.2.1 Analisis Sensitivitas

Parameter sensitivitas sensor diukur melalui kemiringan (*slope*) kurva $\log_{10}(R_s/R_0)$ versus $\log_{10}(\text{ppm relatif})$ menggunakan regresi linear pada 300 data dalam satu sesi pengujian representatif. Dalam konteks pengujian dinamis di dalam *chamber* tertutup bervolume 1.920 cm³, nilai $\log_{10}(R_s/R_0)$ meningkat secara konsisten seiring meningkatnya akumulasi konsentrasi gas LPG, sehingga kurva log-log menghasilkan *slope* bertanda positif. Hal ini mencerminkan karakteristik respons sensor terhadap proses akumulasi gas secara bertahap, di mana peningkatan akumulasi konsentrasi gas di dalam *chamber* menyebabkan perubahan nilai $\log_{10}(R_s/R_0)$ yang semakin besar secara kumulatif. Nilai *slope* yang lebih tinggi mengindikasikan laju perubahan resistansi yang lebih besar per satuan kenaikan konsentrasi gas, sehingga digunakan sebagai metrik kuantitatif sensitivitas sensor dalam penelitian ini.

Hasil analisis regresi linear log-log menunjukkan bahwa sensor MQ-5 mencatatkan nilai *slope* = 0,7914 dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9080$, sedangkan sensor MQ-4 menghasilkan *slope* = 0,6505 dengan $R^2 = 0,9431$. Nilai *slope* yang lebih tinggi pada MQ-5 mengindikasikan perubahan resistansi yang lebih besar per satuan kenaikan konsentrasi gas, yang berarti MQ-5 memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap gas LPG dibandingkan MQ-4. Selisih *slope* sebesar 0,1409 setara dengan peningkatan sensitivitas sebesar ~21,7%. Temuan ini konsisten dengan (Khakim et al., 2022) yang melaporkan sensitivitas tinggi MQ-5 terhadap LPG dan butana dalam kondisi pengujian laboratorium. Grafik sensitivitas kedua sensor disajikan pada Gambar 5.

Meskipun *slope* MQ-5 lebih tinggi, nilai R^2 MQ-4 (0,9431) lebih baik dibandingkan MQ-5 (0,9080), yang mencerminkan *trade-off* umum dalam karakterisasi sensor gas semikonduktor: sensitivitas yang lebih agresif pada MQ-5 disertai linearitas kurva log-log yang sedikit lebih rendah. Konsekuensinya, MQ-5 lebih sesuai sebagai sensor pendeteksi dini berbasis ambang batas, sedangkan MQ-4 lebih cocok untuk pemantauan konsentrasi yang menuntut konsistensi data jangka panjang (Ekah et al., 2024).



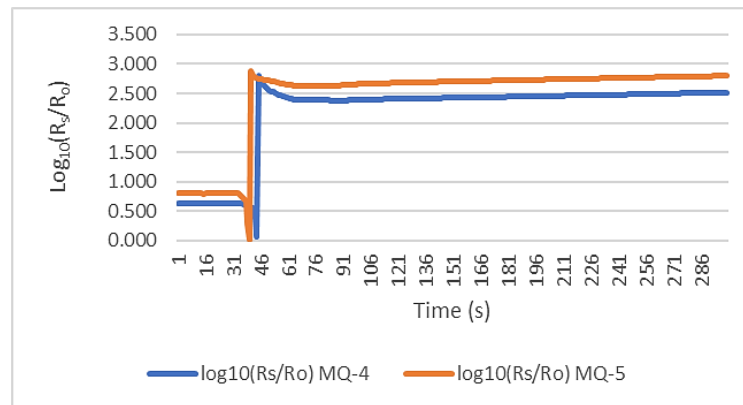
Gambar 5. Grafik Sensitivitas Sensor MQ-4 dan MQ-5 (Kurva $\log_{10}(R_s/R_0)$ vs $\log_{10}(\text{ppm Relatif})$)

Gambar 5 memperlihatkan kurva regresi linear pada skala log-log untuk kedua sensor, di mana sumbu-x merepresentasikan $\log_{10}(\text{ppm relatif})$ dan sumbu-y merepresentasikan $\log_{10}(R_s/R_0)$. Kedua garis regresi menunjukkan tren positif yang konsisten, mencerminkan peningkatan nilai $\log_{10}(R_s/R_0)$ seiring meningkatnya estimasi konsentrasi gas LPG di dalam *chamber*. Meskipun secara visual kemiringan kedua garis tampak serupa akibat perbedaan rentang sebaran data masing-masing sensor pada sumbu-x, nilai *slope* MQ-5 ($y = 0,7914x - 0,0426$, $R^2 = 0,908$) secara matematis lebih besar dibandingkan MQ-4 ($y = 0,6505x - 0,1908$, $R^2 = 0,9431$), dengan selisih *slope* sebesar 0,1409 atau setara 21,7%. Nilai *slope* yang lebih besar pada MQ-5 mengkonfirmasi bahwa sensor ini memiliki laju perubahan R_s/R_0 yang lebih tinggi per satuan kenaikan konsentrasi gas, sehingga lebih sensitif dan lebih cepat merespons akumulasi gas LPG, dan lebih direkomendasikan untuk aplikasi deteksi dini (Khakim et al., 2022). Sebaliknya, meskipun secara visual sebaran data MQ-4 tampak lebih bervariasi akibat adanya titik-titik fase transisi difusi gas yang menyimpang dari garis regresi, nilai R^2 MQ-4 (0,9431) yang lebih tinggi dibandingkan MQ-5 (0,9080) mengkonfirmasi secara matematis bahwa linearitas kurva log-log MQ-4 lebih konsisten, menjadikannya lebih andal untuk pemantauan konsentrasi gas jangka panjang (Ekah et al., 2024). Sebanyak 3 data per sensor (1,0% dari 300 data) yang terlihat menyimpang jauh dari garis regresi merupakan data fase transisi difusi gas yang terjadi sesaat setelah injeksi singkat 1–3 detik, sebagaimana diuraikan pada Tabel 1, dan tidak dikategorikan sebagai kegagalan sistem karena seluruh 30 skenario kebocoran tetap terdeteksi tanpa pengecualian.

3.2.2 Analisis Stabilitas

Stabilitas pembacaan sensor dievaluasi menggunakan standar deviasi (σ) dari distribusi data $\log_{10}(R_s/R_0)$ selama 300 data dalam satu sesi pengujian representatif. Transformasi logaritmik diterapkan karena kurva sensitivitas sensor MQ mengikuti hukum pangkat (*power law*), sehingga domain $\log_{10}(R_s/R_0)$ merupakan ruang yang tepat untuk menganalisis dispersi pembacaan. Hasil perhitungan menunjukkan nilai $\sigma = 0,656$ untuk MQ-4 dan $\sigma = 0,669$ untuk MQ-5. Nilai

yang lebih rendah pada MQ-4 menunjukkan dispersi pembacaan yang lebih kecil dan mengindikasikan konsistensi yang lebih baik. Konfirmasi statistik formal atas perbedaan varians kedua sensor disajikan pada sub-bab 3.2.3 melalui Welch's t-test dan uji F. Grafik stabilitas pembacaan kedua sensor disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Stabilitas Pembacaan Sensor MQ-4 dan MQ-5 ($\log_{10}(R_s/R_o)$ vs Waktu)

Gambar 6 memperlihatkan perubahan nilai $\log_{10}(R_s/R_o)$ kedua sensor terhadap waktu selama 300 detik pengujian. Pada fase pra-paparan ($t = 1-31$ detik), kedua sensor mencatatkan nilai $\log_{10}(R_s/R_o)$ yang rendah dan stabil pada kisaran 0,600–0,800, mengindikasikan kondisi udara bersih di dalam *chamber* sebelum injeksi gas. Penurunan singkat yang terlihat pada $t = 31-46$ detik merupakan 3 titik data fase transisi difusi gas sebagaimana diuraikan pada Tabel 1, dan tidak dikategorikan sebagai kegagalan sistem. Lonjakan tajam kemudian terjadi pada $t = 46-61$ detik secara bersamaan pada kedua sensor, mencapai nilai puncak sekitar 2,700–2,900, mencerminkan respons cepat sistem terhadap akumulasi gas LPG di dalam *chamber* setelah injeksi singkat 1–3 detik. Setelah fase puncak, kurva MQ-5 (oranye) menstabilkan diri pada nilai yang lebih tinggi dan lebih datar pada kisaran 2,500–2,700, sedangkan kurva MQ-4 (biru) menunjukkan kenaikan bertahap secara gradual dari kisaran 2,200 menuju 2,400, konsisten dengan nilai *mean* R_s/R_o MQ-5 yang lebih besar (4,576 berbanding 2,444) sebagaimana dikonfirmasi oleh hasil *Welch's t-test*. Perbedaan pola stabilisasi ini mencerminkan karakteristik intrinsik lapisan sensitif masing-masing sensor yang secara teknis berbeda dalam merespons gas LPG (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2024; 2021; Mukhtarov et al., 2024). Stabilitas pembacaan yang lebih baik pada MQ-4, yang dikuantifikasi melalui nilai $\sigma = 0,656$ berbanding $\sigma = 0,669$ pada MQ-5, menjadikan MQ-4 lebih andal untuk aplikasi pemantauan berkelanjutan (*continuous monitoring*) di mana konsistensi data jangka panjang menjadi prioritas utama.

3.2.3 Validasi Statistik (Welch's t-test)

Untuk memvalidasi perbedaan distribusi respons kedua sensor secara empiris, dilakukan uji Independent Samples t-test dengan asumsi varians tidak sama (Welch's t-test) pada data nilai R_s/R_o (domain linear) dari 300 titik waktu dalam satu sesi pengujian representatif per sensor. Perlu dicatat bahwa data ini merupakan deret waktu (*time-series*) yang direkam setiap 1 detik selama 5 menit, sehingga antar-titik data berpotensi memiliki autokorelasi temporal. Oleh karena itu, uji ini diterapkan sebagai pendekatan komparatif deskriptif untuk mengukur besarnya perbedaan distribusi respons kedua sensor dalam kondisi paparan yang identik, bukan sebagai uji inferensial dengan asumsi independensi penuh antar observasi dan bukan sebagai generalisasi populasi universal. (Galceran et al., 2023) menerapkan pendekatan serupa dalam membandingkan sensor MQ-2 dan MQ-6 pada kondisi pengujian terkontrol, sehingga kerangka komparatif yang sama diterapkan dalam penelitian ini untuk komparasi MQ-4 dan MQ-5. Nilai *mean* R_s/R_o yang dilaporkan merupakan rata-rata keseluruhan 300 titik waktu dalam satu sesi penuh 5 menit, mencakup fase pra-paparan ($t = 0-35$ s), fase paparan aktif ($t = 36-270$ s), dan fase desorpsi ($t > 270$ s). Dominasi fase pra-paparan menyebabkan nilai *mean* R_s/R_o keseluruhan (MQ-4 = 2,444; MQ-5 = 4,576) lebih tinggi dibandingkan nilai *steady-state* kondisi bahaya pada Tabel 2 dan Tabel 3, karena *mean* keseluruhan mencerminkan distribusi respons penuh selama satu sesi, sedangkan Tabel 2 dan 3 mencerminkan nilai representatif pada kondisi konsentrasi tertentu.

Welch's t-test dipilih karena varians kedua kelompok berbeda secara substansial (variens MQ-4 = 0,114; varians MQ-5 = 0,348; rasio varians = 3,05). Pemilihan Welch's t-test dibandingkan Student's t-test standar didasarkan pada rekomendasi untuk kondisi heterogenitas varians (Galceran et al., 2023), dengan tetap mengakui bahwa interpretasinya dalam penelitian ini dibatasi sebagai komparatif deskriptif mengingat sifat data *time-series*. Derajat kebebasan efektif sebesar 476 diperoleh menggunakan aproksimasi Welch-Satterthwaite. Seluruh hasil perhitungan statistik disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Welch's t-test Perbedaan Rata-Rata R_s/R_o antara Sensor MQ-4 dan MQ-5

Statistik	MQ-4	MQ-5
Mean (R_s/R_o)	2,444	4,576
Variance (R_s/R_o)	0,114	0,348
Observations (n)	300	300

Statistik	MQ-4	MQ-5
df (Welch-Satterthwaite)	476	
t-Statistik	-17,172	
t-Kritis ($\alpha = 0,05$, two-tail)	1,965	
P(T≤t) two-tail	$8,64 \times 10^{-52}$	

Berdasarkan Tabel 4, diperoleh nilai $|t\text{-hitung}| = 17,172$ yang jauh melampaui $t\text{-kritis} = 1,965$, dengan nilai $p = 8,64 \times 10^{-52}$ yang berada sangat jauh di bawah $\alpha = 0,05$. Mengingat sifat data *time-series* yang digunakan, nilai p ini tidak diinterpretasikan sebagai probabilitas inferensial populasi, melainkan sebagai indikator kuantitatif yang menunjukkan bahwa perbedaan distribusi respons antara MQ-4 dan MQ-5 sangat besar dan konsisten dalam kondisi pengujian ini. Rata-rata R_s/R_0 MQ-5 yang lebih tinggi (4,576 vs 2,444) mengkonfirmasi bahwa kedua sensor beroperasi pada rentang resistansi yang secara intrinsik berbeda terhadap paparan gas LPG yang sama, mencerminkan perbedaan karakteristik lapisan sensitif masing-masing sensor sesuai spesifikasi pabrikan (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2024; 2021)

Untuk mengkonfirmasi signifikansi perbedaan varians secara formal, dilakukan uji F (*Variance Ratio Test*) dengan $H_0: \sigma^2_{MQ-4} = \sigma^2_{MQ-5}$. Hasil uji F menghasilkan $F\text{-hitung} = 0,348/0,114 = 3,053$, dibandingkan $F\text{-kritis} = 1,210$ pada $df_1 = df_2 = 299$ dan $\alpha = 0,05$. Karena $F\text{-hitung}$ (3,053) melampaui $F\text{-kritis}$ (1,210), H_0 ditolak dan disimpulkan bahwa varians MQ-4 secara statistik signifikan lebih kecil dari varians MQ-5 dalam kondisi pengujian ini, konsisten dengan analisis stabilitas pada Sub-bab 3.2.2 yang menunjukkan $\sigma \log_{10}(R_s/R_0)$ MQ-4 = 0,656 lebih rendah dibandingkan MQ-5 = 0,669.

Data estimasi ppm relatif selama pengujian menunjukkan pola lonjakan konsentrasi pada fase akumulasi gas di dalam *chamber* dan penurunan bertahap setelahnya. Tabel 5 menyajikan 10 data representatif dari total 300 data per sesi, dipilih untuk mewakili fase awal ($t = 1$ s), fase transisi ($t = 39\text{--}40$ s), fase puncak ($t = 45\text{--}57$ s), fase penurunan bertahap ($t = 160\text{--}270$ s), dan fase akhir sesi ($t = 300$ s). Lonjakan tajam antara $t = 39$ s dan $t = 57$ s terjadi karena gas LPG terakumulasi secara cepat di dalam volume *chamber* yang kecil (1.920 cm³), sehingga konsentrasi gas meningkat drastis dalam waktu singkat setelah injeksi 1–3 detik. Perbedaan nilai estimasi ppm antara MQ-4 dan MQ-5 pada titik waktu yang sama mencerminkan perbedaan konstanta kurva power-law (a dan b) masing-masing *datasheet*, bukan perbedaan konsentrasi aktual gas di dalam *chamber*.

Tabel 5. Data Pengukuran Estimasi PPM Relatif Representatif Selama Pengujian

No.	Waktu (s)	PPM Relatif MQ-4	PPM Relatif MQ-5	Kategori
1	1	17,3	11,0	Aman
2	39	23,0	164,6	Aman
3	40	24,5	661,9	Waspada
4	45	1.600,2	2.496,1	Bahaya
5	57	10.143,3	3.670,1	Bahaya
6	160	12.481,4	3.099,4	Bahaya
7	200	10.951,3	2.718,8	Bahaya
8	240	9.644,9	2.367,9	Bahaya
9	270	8.649,3	2.134,2	Bahaya
10	300	7.812,8	1.942,9	Bahaya

Berdasarkan Tabel 5, pada $t = 1$ s (fase awal sebelum injeksi gas), kedua sensor mencatatkan estimasi ppm yang sangat rendah (MQ-4 = 17,3 ppm; MQ-5 = 11,0 ppm) yang masuk kategori aman, mengkonfirmasi tidak adanya gas residual di dalam *chamber* sebelum pengujian dimulai. Pada $t = 39$ s, estimasi ppm masih berada pada kategori aman untuk kedua sensor (MQ-4 = 23,0 ppm; MQ-5 = 164,6 ppm). Transisi ke kategori waspada pertama kali terdeteksi pada $t = 40$ s untuk MQ-5 (661,9 ppm), sedangkan MQ-4 masih mencatatkan 24,5 ppm pada waktu yang sama, yang menunjukkan MQ-5 lebih cepat merespons akumulasi gas pada fase awal paparan. Pada $t = 45$ s, kedua sensor telah memasuki kategori bahaya (MQ-4 = 1.600,2 ppm; MQ-5 = 2.496,1 ppm), mengkonfirmasi bahwa injeksi gas 1–3 detik menyebabkan peningkatan konsentrasi yang sangat cepat di dalam *chamber* tertutup bervolume 1.920 cm³. Pada fase penurunan ($t = 160\text{--}300$ s), MQ-5 menunjukkan penurunan konsisten dari 3.099,4 menuju 1.942,9 ppm, mencerminkan proses desorpsi gas yang bertahap. Estimasi ppm MQ-4 pada rentang ini (12.481,4–7.812,8 ppm) berada di luar rentang valid kurva *datasheet* (300–10.000 ppm CH₄) dan merupakan hasil ekstrapolasi power-law pada kondisi R_s/R_0 yang sangat rendah, sehingga tidak diinterpretasikan sebagai konsentrasi aktual; perbandingan kinerja utama kedua sensor pada penelitian ini didasarkan pada parameter R_s/R_0 dan *slope* log-log, bukan pada nilai estimasi ppm absolut.

3.3 Pembahasan

Hipotesis penelitian yang menyatakan bahwa MQ-5 memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap gas LPG sedangkan MQ-4 memiliki stabilitas pembacaan yang lebih baik terbukti secara empiris berdasarkan seluruh parameter kuantitatif yang telah dianalisis. Ringkasan perbandingan parameter kinerja kedua sensor disajikan pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Ringkasan Perbandingan Kinerja Sensor MQ-4 dan MQ-5

Parameter Kinerja	MQ-4	MQ-5
<i>Slope</i> sensitivitas (log-log)	0,6505	0,7914
Koefisien determinasi (R^2)	0,9431	0,9080
σ distribusi $\log_{10}(Rs/R_0)$	0,656	0,669
Variance Rs/R ₀	0,114	0,348
Mean Rs/R ₀ (300 data)	2,444	4,576
Rekomendasi penggunaan	Pemantauan jangka panjang	Deteksi dini cepat

Berdasarkan Tabel 6, MQ-5 unggul pada parameter sensitivitas (*slope* 0,7914 vs 0,6505), sedangkan MQ-4 unggul pada seluruh parameter stabilitas: $\sigma \log_{10}$ lebih rendah (0,656 vs 0,669), varians lebih kecil (0,114 vs 0,348), dan R^2 lebih tinggi (0,9431 vs 0,9080). Respons MQ-5 yang lebih sensitif selaras dengan spesifikasi pabrikan yang mengoptimalkan lapisan sensitif sensor ini untuk mendeteksi propana dan butana secara spesifik, yang merupakan komponen utama gas LPG. (Khakim et al., 2022) secara khusus melaporkan sensitivitas tinggi MQ-5 terhadap LPG dan butana, yang mengkonfirmasi temuan penelitian ini.

Sensor MQ-4 yang dikalibrasi untuk metana dan gas alam menunjukkan respons yang lebih gradual dengan fluktuasi lebih rendah. (Mukhtarov et al., 2024) yang membandingkan MQ-2 dan MQ-4 melaporkan bahwa MQ-4 memiliki selektivitas lebih tinggi untuk metana dengan dinamika reaksi yang lebih terkendali. Hal ini tercermin pada nilai $\sigma \log_{10}$ MQ-4 (0,656) dan varians (0,114) yang lebih kecil dibandingkan MQ-5, menjadikannya kandidat ideal untuk sistem pemantauan berkelanjutan yang menuntut konsistensi data. (Ramadhani et al., 2024) mengkonfirmasi keandalan MQ-4 melalui karakterisasi yang menemukan kesalahan relatif rata-rata hanya 0,066% dalam pengukuran konsentrasi metana, yang menunjukkan konsistensi pembacaan tinggi sensor ini dalam aplikasi monitoring berbasis mikrokontroler.

Perbandingan dengan penelitian terdahulu mengkonfirmasi kebaruan pendekatan metodologis penelitian ini. (Galceran et al., 2023) membandingkan MQ-2 dan MQ-6 menggunakan uji-t dan menemukan perbedaan signifikan, namun tidak mengkuantifikasi sensitivitas melalui kurva log-log dan tidak menyertakan MQ-4 atau MQ-5. (Ekah et al., 2024) dalam tinjauan sistematisnya menyoroti bahwa performa sensor seri MQ sangat dipengaruhi faktor lingkungan, namun tidak menyediakan data kuantitatif langsung antara MQ-4 dan MQ-5. (Mukhtarov et al., 2024) membandingkan MQ-2 dan MQ-4, namun tidak menyertakan MQ-5 dalam komparasi. Penelitian ini melampaui batasan tersebut dengan menempatkan MQ-4 dan MQ-5 dalam satu sistem identik, mengintegrasikan metrik *slope* logaritmik sebagai standar objektif sensitivitas, dan melengkapinya dengan validasi Welch's t-test pada 300 titik waktu per sensor sehingga menghasilkan rekomendasi berbasis data komparatif yang terukur.

Dari perspektif kontribusi rekayasa, penelitian ini menghasilkan rekomendasi yang bersifat komplementer. Sensor MQ-5 direkomendasikan untuk modul deteksi dini yang mengutamakan kecepatan respons dan sensitivitas tinggi, sedangkan MQ-4 lebih optimal untuk modul pemantauan jangka panjang yang memerlukan stabilitas data dalam operasional berkelanjutan. Sinergi kedua karakteristik ini dapat diintegrasikan dalam desain sistem hibrida untuk memaksimalkan cakupan deteksi sekaligus meminimalkan risiko false negative maupun false positive (Pravda & Kurniawan, 2025; Prasetyo & Paramytha, 2023).

Chamber akrilik berukuran $16 \times 12 \times 10$ cm pada penelitian ini tidak sepenuhnya merepresentasikan dinamika difusi gas di ruangan terbuka atau berventilasi. Pengujian juga belum secara eksplisit memisahkan pengaruh variabel lingkungan seperti suhu dan kelembaban yang diketahui dapat memengaruhi drift sensor semikonduktor oksida logam (Ekah et al., 2024). Keterbatasan ini tidak mengurangi validitas temuan komparatif utama, karena kedua sensor diuji dalam kondisi lingkungan yang sepenuhnya identik sehingga perbedaan yang teramati mencerminkan karakteristik intrinsik masing-masing sensor. Penelitian selanjutnya disarankan mengadopsi ruang uji dengan konsentrasi gas terkalibrasi menggunakan gas standar bersertifikat, mengintegrasikan sensor suhu dan kelembaban untuk kompensasi drift lingkungan, dan mengembangkan modul komunikasi nirkabel untuk pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) (Prasetyo & Paramytha, 2023).

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil membuktikan secara kuantitatif dan statistik bahwa sensor MQ-4 dan MQ-5 memiliki profil kinerja yang berbeda namun saling melengkapi. MQ-5 unggul dalam sensitivitas dengan *slope* 0,7914 dan mean $Rs/R_0 = 4,576$, sementara MQ-4 menunjukkan stabilitas yang lebih baik dengan $\sigma \log_{10} = 0,656$ dan varians $Rs/R_0 = 0,114$. Sistem deteksi yang dikembangkan berhasil mendeteksi seluruh 30 skenario kebocoran (100%) tanpa *false alarm*, dengan 297 dari 300 data per sensor menunjukkan kesesuaian terhadap logika klasifikasi sistem (tingkat keberhasilan klasifikasi 99,0% per sesi). Temuan ini memberikan landasan empiris yang kuat bagi pengembang sistem dan peneliti di bidang informatika terapan untuk merancang solusi deteksi kebocoran gas LPG yang andal, terukur, sederhana, dan ekonomis (Cipta Lismana et al., 2025; Ramadhani et al., 2024).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membandingkan kinerja sensor MQ-4 dan MQ-5 secara kuantitatif dalam satu sistem deteksi kebocoran gas LPG berbasis Arduino Uno melalui eksperimen terkontrol di dalam *chamber* akrilik tertutup berukuran $16 \times 12 \times 10$ cm dengan 30 sesi pengujian dan 300 data per sesi. Hipotesis penelitian didukung secara empiris: sensor



MQ-5 memiliki sensitivitas lebih tinggi dengan nilai *slope* kurva $\log_{10}(R_s/R_o)$ versus $\log_{10}(\text{ppm relatif})$ sebesar 0,7914 ($R^2 = 0,9080$), dibandingkan sensor MQ-4 yang menghasilkan *slope* 0,6505 ($R^2 = 0,9431$), dengan selisih sensitivitas sebesar 21,7%. Sebaliknya, sensor MQ-4 menunjukkan stabilitas pembacaan yang lebih baik dengan standar deviasi distribusi $\log_{10}(R_s/R_o)$ sebesar 0,656 dan varians R_s/R_o sebesar 0,114, dibandingkan MQ-5 dengan standar deviasi 0,669 dan varians 0,348; perbedaan varians ini dikonfirmasi signifikan melalui uji F dengan $F\text{-hitung} = 3,053$ melampaui $F\text{-kritis} = 1,210$, serta diperkuat secara komparatif oleh Welch's *t-test* dengan $|t\text{-hitung}| = 17,172$ yang melampaui $t\text{-kritis} = 1,965$ ($p = 8,64 \times 10^{-52}$). Sistem deteksi berhasil mendeteksi seluruh 30 skenario kebocoran gas (100%) tanpa *false alarm* pada kondisi udara bersih, dengan tingkat keberhasilan klasifikasi 99,0% per sesi (297 dari 300 data); 3 data yang tersisa merupakan variasi alami pada fase transisi difusi gas dan tidak dikategorikan sebagai kegagalan sistem. Berdasarkan temuan ini, MQ-5 direkomendasikan untuk aplikasi deteksi dini yang mengutamakan kecepatan respons, sedangkan MQ-4 lebih sesuai untuk pemantauan jangka panjang yang menuntut konsistensi data. Keterbatasan penelitian ini meliputi pengujian yang dilakukan dalam *chamber* bervolume kecil (1.920 cm³) yang belum merepresentasikan kondisi ruangan berventilasi nyata, penggunaan gas dari korek api isi ulang sebagai pengganti gas standar bersertifikat sehingga seluruh nilai ppm bersifat estimasi relatif berbasis ekstrapolasi *power-law* dari *datasheet* resmi sensor, serta belum dikontrolnya variabel lingkungan seperti suhu dan kelembaban. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan ruang uji yang lebih representatif dengan gas standar bersertifikat, mengintegrasikan sensor suhu dan kelembaban sebagai kompensasi *drift* lingkungan, menganalisis data dari seluruh 30 sesi secara agregat, serta mengembangkan sistem komunikasi nirkabel berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mewujudkan solusi pemantauan kebocoran gas LPG rumah tangga yang lebih komprehensif dan dapat diterapkan secara luas.

REFERENCES

- Az Zahro, F. N., & Rahmadewi, R. (2023). Prototype pendeteksi asap kebakaran dan kebocoran gas berbasis Arduino Uno dengan menggunakan sensor gas MQ-5. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(10), 161–171. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7983528>
- Baskoro, G. R., Khair, U., & Mardiana, M. (2023). Perancangan alat pendeteksi kebocoran tabung gas elpiji berbasis Arduino Uno. *Algoritma: Jurnal Ilmu Komputer Dan Informatika*, 7(2), 42–52. <https://doi.org/10.30829/algoritma.v7i2.20223>
- Badan Pusat Statistik (2024). *Statistik kesejahteraan rakyat 2024* (Vol. 39). BPS-Statistics Indonesia. <https://www.bps.go.id/id/publication/2024/10/25/30e924add700e5a928c0b26b/statistik-kesejahteraan-rakyat-2024.html>
- Cipta Lismana, G., A'an Auliq, M., & Rintyarna, B. S. (2025). Perancangan dan implementasi sensor MQ-4 gas metana (ch4) pada sistem biogas berbasis mikrokontroler Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputasi (ELKOM)*, 7(1), 99–108. <https://doi.org/10.32528/elkom.v7i1.11458>
- Ekah, U. J., Ozuomba, S., & Ekott, E. (2024). Evaluating mq sensors in gas leakage detection systems. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 11(9), 12–16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13837242>
- Eviolina, P. V., Yudi, K., & Prihartono, E. (2025). Sistem deteksi kebocoran gas LPG berbasis Arduino di universitas dr. Soetomo surabaya. *Router: Jurnal Teknik Informatika Dan Terapan*, 3(2), 184–196. <https://doi.org/10.62951/router.v3i2.620>
- Fauzi, M. A., & Sukarno, S. A. (2025). Pengembangan sistem pendeteksi kebocoran gas LPG berbasis IoT: integrasi sensor MQ-02 dan DHT11 untuk pemantauan real-time. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1), 1467–1474. <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5980>
- Galceran, S. D., John Villarico, F. H., Jeffrey Omas, J. C., Carla Estaniel, L. P., Jay Saldo, I. P., Roy Calo, J. D., & Jade Dandoy, M. P. (2023). Development and comparison of Arduino based MQ-2 and MQ-6 LPG leak sensors. *American Journal of Sensor Technology*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.12691/ajst-7-1-1>
- Khakim, L., Afriliana, I., Nurohim, N., & Rakhman, A. (2022). Proteksi kebocoran gas LPG rumah tangga berbasis mikrokontroler. *Komputika: Jurnal Sistem Komputer*, 11(1), 40–47. <https://doi.org/10.34010/komputika.v11i1.4977>
- Kiran, R., Vibha, M. B., Amith, N. G., Rashmi, M., Sahana, M. T., Patil, A., & Kori, A. (2024). Integration of MQ-5 gas sensors with Arduino board. *J. Electrical Systems*, 20(10), 2154–2165. <https://doi.org/10.52783/jes.5540>
- Laitera, S., Dewa, W. A., & Arifin, S. (2022). Penerapan sistem alarm berbasis Arduino Uno untuk mendeteksi kebocoran gas LPG. *Jurnal Janitra Informatika Dan Sistem Informasi*, 2(2), 96–106. <https://doi.org/10.25008/janitra.v2i2.159>
- Mukhtarov, F., Jo'rayev, N., Zokirov, S., Sadikova, M., Muhammadjonov, A., & Iskandarova, N. (2024). Analysis of automation through sensors through gas sensors in different directions. *E3S Web of Conferences*, 508, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450806004>
- Prasetyo, M. A., & Paramytha, N. (2023). Pengembangan sistem pendeteksi kebocoran gas LPG dengan teknologi IoT dan sensor MQ-5. *Jurnal Ampere*, 8(2), 103–115. <https://doi.org/10.31851/ampere.v8i2.9240>
- Pravda, M. D. I., & Kurniawan, R. (2025). Prototype sistem pemantauan kebocoran gas LPG menggunakan sensor MQ-5 dan DHT11 dengan metode fuzzy mamdani. *CESS (Journal of Computer Engineering, System and Science)*, 10(2), 550–562. <https://doi.org/10.24114/cess.v10i2.67148>



- Ramadhani, I. G. A. I. F., Indrasari, W., Suhendar, H., & Marpaung, M. A. (2024). Karakterisasi dan pengujian sensor MQ-4 dan mg-811 untuk pengembangan sistem monitoring konsentrasi gas metana dan karbon dioksida di udara. *Joint Prosiding IPS Dan Seminar Nasional Fisika*, 12, FA-81-86. <https://doi.org/10.21009/03.1201.FA12>
- Sumaedi, A., Rosman, F. R., & Fiqri, F. (2024). Perancangan sistem keamanan pendeteksi gas dalam ruangan menggunakan sensor gas MQ-2 berbasis mikrokontroler Arduino Uno R3. *Jurnal SISKOM-KB (Sistem Komputer Dan Kecerdasan Buatan)*, 7(3), 198–207. <https://doi.org/10.47970/siskom-kb.v7i3.675>
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. (2021). *Flammable Gas Sensor (MQ-5) Manual*. <https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/mq-5.pdf>
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. (2024). *Flammable Gas Sensor (MQ-4) Manual*. <https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/mq-4.pdf>