

Rancang Bangun Prototipe Sistem Deteksi dan Peringatan Dini Kebocoran Gas LPG pada Truk Tangki Berbasis Arduino Uno dengan Notifikasi SMS dan Lokasi GPS

Aldi Rizki Saputra¹, Gunawan², Abdul Haris³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Rekayasa Otomotif, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan, Jl. Semeru No. 3, Kota Tegal, Jawa Tengah, Indonesia

e-mail: ¹aldirizkisaputra99@gmail.com, ²gunawan@pktj.ac.id, ³aharisf@pktj.ac.id

Received 23-oktober-2026; Reviewed 25-oktober-2026; Accepted 28-oktober-2026

Journal Homepage: <http://ktj.pktj.ac.id/index.php/jat>

DOI: 10.46447/jat.v4i2.853

Abstract

Leakage from LPG tank trucks can escalate into fire, vapour cloud explosion, or BLEVE, yet a leak may go unnoticed by the driver during a trip. This study designed and tested, at laboratory scale, a low-cost early-warning prototype for LPG tank trucks. Following a research-and-development procedure limited to prototype testing, the system combines an MQ-6 gas sensor, an Arduino Uno, a buzzer, a 16×2 LCD, a GPS module, and a SIM800L GSM module that sends an SMS containing the leak status and coordinates. Tests were run on a miniature tank truck using a butane canister. In five functional trials (two without gas, three with gas), all outputs matched the design logic. Mean detection time increased with release distance, from 1.40 s (SD 0.20) at 5 cm to 15.37 s (SD 2.80) at 25 cm ($t = 0.708d - 2.64$; $R^2 = 0.951$). The mean SMS delay was 7.86 s (SD 0.51), giving an estimated detection-to-notification time of about 23 s at 25 cm. GPS output was stable in a static test, but positional error was not measured. Field testing, sensor calibration, and certified explosion-protected hardware are required before vehicle use.

Keywords: LPG leak detection, tank truck, MQ-6 sensor, early warning, transport safety

Abstrak

Kebocoran pada truk tangki LPG dapat berkembang menjadi kebakaran, ledakan awan uap, atau BLEVE, sementara pengemudi belum tentu menyadari kebocoran selama perjalanan. Penelitian ini merancang dan menguji, pada skala laboratorium, prototipe peringatan dini berbiaya rendah untuk truk tangki LPG. Dengan prosedur penelitian dan pengembangan yang dibatasi hingga uji coba prototipe, sistem memadukan sensor gas MQ-6, Arduino Uno, buzzer, LCD 16×2, modul GPS, dan modul GSM SIM800L yang mengirim SMS berisi status kebocoran dan koordinat lokasi. Pengujian dilakukan pada miniatur truk tangki menggunakan gas butana kaleng. Pada lima uji fungsional (dua tanpa gas, tiga dengan gas), seluruh keluaran sesuai logika rancangan. Rerata waktu deteksi meningkat seiring jarak sumber gas, dari 1,40 s (SD 0,20) pada 5 cm menjadi 15,37 s (SD 2,80) pada 25 cm ($t = 0,708d - 2,64$; $R^2 = 0,951$). Rerata delay SMS 7,86 s (SD 0,51) sehingga perkiraan waktu dari deteksi hingga notifikasi pada jarak 25 cm sekitar 23 s. Keluaran GPS stabil pada uji statis, tetapi galat posisi belum diukur. Uji lapangan, kalibrasi sensor, dan perangkat bersertifikat proteksi ledakan diperlukan sebelum diterapkan pada kendaraan.

Kata kunci: *deteksi kebocoran LPG, truk tangki, sensor MQ-6, peringatan dini, keselamatan transportasi*

PENDAHULUAN

Truk tangki LPG merupakan angkutan barang khusus yang membawa bahan berbahaya dan beracun (B3), yaitu zat atau komponen yang karena sifat, konsentrasi, atau jumlahnya dapat membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, dan kelangsungan hidup manusia (Republik Indonesia, 2009, Pasal 1 angka 21). Penyelenggaraan angkutan barang khusus dan barang berbahaya dengan kendaraan bermotor di jalan diatur lebih lanjut dalam Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 60 Tahun 2019 (Kementerian Perhubungan, 2019). Data insiden nasional yang spesifik tidak ditambahkan karena sumber primer beserta angka kerugian belum tersedia dalam bahan penelitian yang diperiksa. Untuk versi publikasi final, data insiden perlu ditambahkan hanya jika dapat diverifikasi dari laporan resmi atau pemberitaan kredibel.

LPG adalah campuran propana dan butana yang uapnya lebih berat daripada udara sehingga cenderung terkumpul di dekat permukaan tanah. Campuran uap LPG dan udara mudah terbakar pada rentang konsentrasi tertentu rentang batas mudah terbakar harus dirujuk pada lembar data keselamatan (SDS) untuk komposisi LPG yang digunakan; angka batas tidak dicantumkan karena SDS spesifik tidak tersedia dalam bahan penelitian. Pada truk tangki, kebocoran dapat berasal dari katup, flange, selang bongkar-muat, tekanan berlebih, atau kerusakan tangki akibat tabrakan dan terguling. Jika tersulut, kebocoran dapat berkembang menjadi jet fire, ledakan awan uap (vapour cloud explosion), atau boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE) dengan radius dampak puluhan hingga ratusan meter (Y. Wang et al., 2020; K. Wang et al., 2023; Ardila-Suarez et al., 2025). Kecelakaan angkutan barang berbahaya juga berdampak luas pada manusia, lingkungan, dan infrastruktur (Stojanović et al., 2023). Kerapatan tangki dan kondisi teknis kendaraan termasuk faktor yang paling berpengaruh terhadap keselamatan angkutan tersebut (Batarlienè, 2020), di samping faktor pengemudi (Bęczkowska & Zysińska, 2021; Ma et al., 2020).

Deteksi dini memberi waktu bagi pengemudi dan pihak terkait untuk bertindak sebelum kebocoran berkembang menjadi kebakaran. Sensor semikonduktor oksida logam (MOS) seperti seri MQ banyak dipakai karena murah dan responsif, tetapi memiliki sensitivitas silang terhadap gas lain serta dipengaruhi suhu dan kelembapan sehingga memerlukan kalibrasi dan kompensasi (Goel et al., 2023; Abdullah et al., 2022; Miquel-Ibarz et al., 2022; Furuta et al., 2024; Panzardi et al., 2025). Perbandingan penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 1. Sebagian besar sistem berbasis MQ-6 dirancang untuk tabung LPG rumah tangga yang diam (Rimbawati et al., 2019; Rahmalisa et al., 2021; Oo, 2021; Pamungkas et al., 2024). Penerapan pada truk tangki yang bergerak, dengan pelaporan lokasi, baru dilaporkan oleh Dash et al. (2023), tetapi tanpa data waktu deteksi yang terukur.

Tabel 1. Perbandingan penelitian terdahulu tentang deteksi kebocoran LPG berbasis sensor MOS

Penelitian	Sensor/pengendali	Komunikasi	Objek	Hasil kuantitatif yang dilaporkan
Rimbawati et al. (2019)	MQ-6; mikrokontroler	Buzzer lokal	Tabung LPG rumah tangga	Ambang tegangan keluaran sensor (AMAN/BERBAHAYA)
Rahmalisa et al. (2021)	MQ-6; Wemos D1	Telegram (Wi-Fi)	Tabung LPG rumah tangga	Ambang nilai sensor 80
Oo (2021)	MQ-6, load cell; Arduino MKR	IoT, SMS	Tabung LPG rumah tangga	Notifikasi isi tabung < 20%
Pamungkas et al. (2024)	MQ-6; Arduino Uno	Lokal (blower, servo, busa)	Tabung LPG rumah tangga	Rata-rata waktu uji 9,56 s
Dash et al. (2023)	MQ-2, LM35, GPS NEO-6M	SMS, IoT, model AI	Truk tangki LPG	Prediksi radius dampak; waktu deteksi tidak dilaporkan
Penelitian ini	MQ-6; Arduino Uno	Buzzer, LCD, SMS + koordinat GPS	Miniatur truk tangki LPG	Waktu deteksi vs jarak, delay SMS, perkiraan latensi

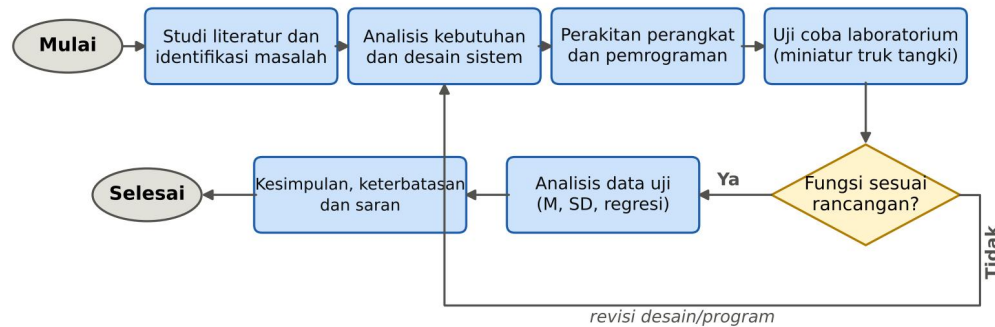
Sumber: Disarikan dari pustaka

Celah tersebut menjadi dasar kontribusi penelitian ini, yaitu (1) memadukan alarm lokal dan notifikasi SMS berisi koordinat GPS dalam satu prototipe berbiaya rendah untuk konteks truk tangki LPG; (2) mengukur secara kuantitatif waktu deteksi terhadap jarak sumber gas dan delay pengiriman SMS, lalu memperkirakan latensi dari deteksi hingga notifikasi; serta (3) memetakan posisi alat dalam pengendalian bahaya dan kebutuhan teknis sebelum alat dapat dipasang pada kendaraan. Tujuan penelitian ini adalah merancang prototipe tersebut, menguji fungsinya pada miniatur truk tangki, mengukur kinerja waktu deteksi dan pengiriman notifikasi, serta mengidentifikasi bahaya kebocoran LPG yang relevan dengan peran alat.

METODE

Desain Penelitian

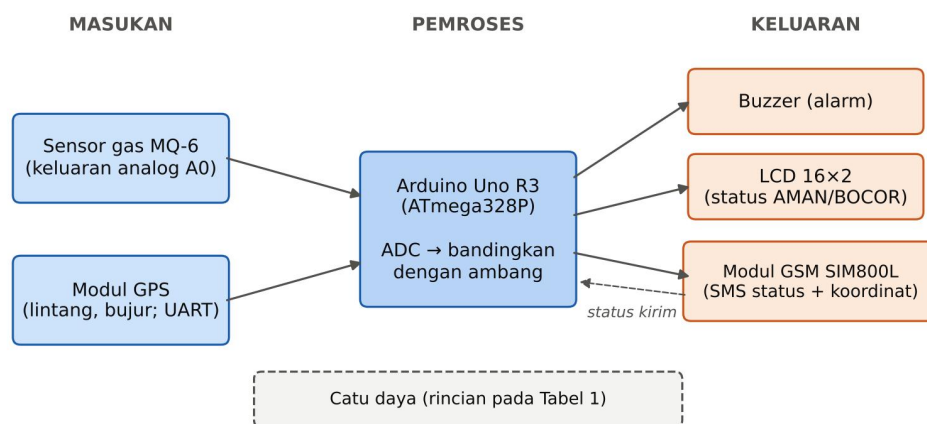
Penelitian ini menggunakan prosedur penelitian dan pengembangan (*research and development*, R&D) yang mengacu pada Sugiyono (2015). Tahapan yang dilaksanakan dibatasi pada identifikasi masalah, pengumpulan informasi, desain produk, pembuatan prototipe, dan uji coba produk skala laboratorium (Gambar 1). Tahap validasi ahli, uji coba pemakaian di lapangan, dan revisi produk berikutnya belum dilakukan sehingga dinyatakan sebagai keterbatasan penelitian.



Gambar 1. Tahapan penelitian
Sumber: Disusun oleh penulis

Rancangan Sistem

Diagram blok sistem disajikan pada Gambar 2 dan spesifikasi komponen pada Tabel 2. Sensor MQ-6 membaca respons terhadap gas melalui keluaran analog yang dikonversi oleh ADC Arduino Uno. Nilai ADC dibandingkan dengan ambang (threshold), tetapi nilai ambang dan metode penetapannya tidak terdokumentasi dalam catatan teknis yang tersedia. Sistem tidak mengonversi keluaran sensor ke satuan ppm atau %LEL karena kalibrasi dengan gas standar belum dilakukan. Oleh karena itu, LCD hanya menampilkan status biner AMAN atau BOCOR, bukan konsentrasi atau tingkat kebocoran gas.



Gambar 2. Diagram blok sistem deteksi dini kebocoran gas
Sumber: Disusun oleh penulis

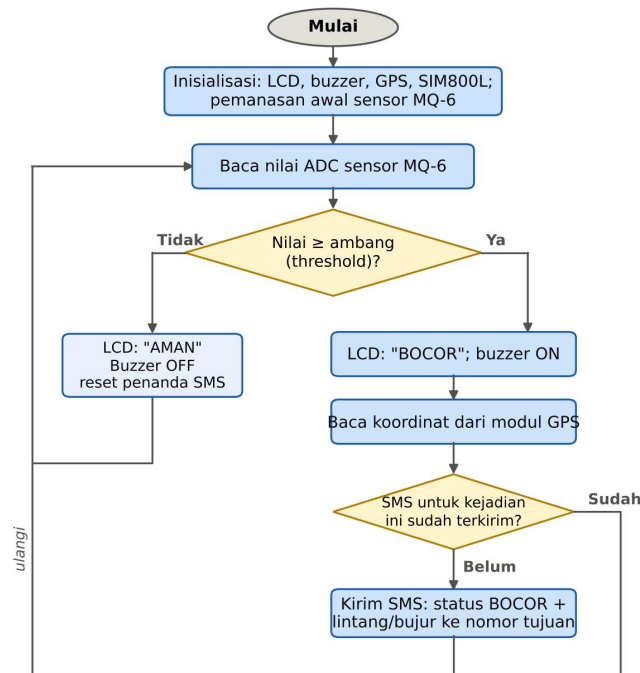
Tabel 2. Spesifikasi komponen prototipe

Komponen	Fungsi dan spesifikasi utama	Keterangan
Arduino Uno R3	Mikrokontroler ATmega328P, 5 V, 16 MHz, ADC 10 bit	Pengolah utama
Sensor gas MQ-6	Sensor MOS untuk LPG/propana; rentang deteksi 300–10.000 ppm; pemanas 5 V, ≤ 950 mW; pemanasan awal > 48 jam	Keluaran analog ke A0 (Zhengzhou Winsen Electronics Technology, 2014)
Modul GSM SIM800L	Modul GSM/GPRS 2G untuk SMS	Catu: tidak tercatat dalam dokumentasi teknis yang tersedia
Modul GPS	tidak teridentifikasi dalam dokumentasi teknis yang tersedia; data lintang-bujur via UART	Antena: tidak tercatat dalam dokumentasi teknis yang tersedia

Komponen	Fungsi dan spesifikasi utama	Keterangan
LCD 16×2	Menampilkan status AMAN/BOCOR	tidak teridentifikasi dalam dokumentasi teknis yang tersedia
Buzzer	Alarm bunyi di kabin	Tingkat bunyi belum diukur
Catu daya	sumber, tegangan, dan arus maksimum tidak tercatat dalam dokumentasi teknis yang tersedia	Jalur SIM800L dipisah dari pin 5 V Arduino

Sumber: Lembar data komponen dan rancangan penulis

Pada miniatur, sensor ditempatkan di area kotak katup sesuai dokumentasi visual, tetapi ketinggian dan posisi terukur tidak tercatat. Posisi dekat titik yang disimulasikan sebagai katup dimaksudkan untuk mewakili salah satu lokasi potensi kebocoran, bukan membuktikan lokasi pemasangan optimal pada truk operasional. Lembar data MQ-6 menyarankan pemanasan awal lebih dari 48 jam (Zhengzhou Winsen Electronics Technology, 2014); durasi pemanasan aktual pada pengujian ini tidak tercatat dalam catatan yang tersedia. Algoritma program disajikan pada Gambar 3. Jika nilai sensor melampaui ambang, buzzer berbunyi, LCD menampilkan BOCOR, koordinat dibaca dari modul GPS, dan SMS dikirim. Pihak penerima SMS tidak disebutkan dalam catatan penelitian yang tersedia. Program belum memuat logika khusus untuk kondisi tanpa sinyal GSM atau tanpa fix GPS.



Gambar 3. Diagram alir algoritma program

Sumber: Disusun oleh penulis

Skenario Pengujian dan Analisis Data

Skenario pengujian dirangkum pada Tabel 3. Pengujian dilakukan di dalam ruangan pada miniatur truk tangki menggunakan gas butana kaleng 220 g berlabel LPG liquefied butane dengan kepala semprot, bukan LPG komersial campuran propana-butana. Volume ruang, ventilasi, suhu, kelembapan, dan durasi semprot tidak tercatat secara terukur dalam catatan pengujian yang tersedia. Waktu deteksi didefinisikan dalam naskah sebagai selang waktu sejak gas mulai disemprotkan hingga LCD menampilkan BOCOR dan buzzer menyala; alat ukur waktu tidak disebutkan. Delay SMS dilaporkan sebagai waktu pengiriman, tetapi operator seluler, kekuatan sinyal, dan konfirmasi waktu

penerimaan tidak terdokumentasi secara lengkap. Rincian prosedur keselamatan pengujian juga belum lengkap pada dokumentasi yang tersedia. Kekurangan pencatatan ini membatasi replikasi dan generalisasi hasil; pengujian lanjutan harus menggunakan protokol keselamatan tertulis dan pencatatan kondisi uji secara terukur.

Tabel 3. Skenario, ulangan, dan kriteria pengujian

Pengujian	Variabel yang diukur	Ulangan	Kriteria keberhasilan
Fungsional sistem	Status sensor, buzzer, LCD, SMS, GPS	5 (2 tanpa gas, 3 dengan gas)	Seluruh keluaran sesuai logika rancangan
Waktu deteksi MQ-6	Waktu sejak semprot hingga status BOCOR pada jarak 5–25 cm	3 per jarak	Gas terdeteksi pada seluruh jarak uji
Pengiriman SMS	Status kirim dan delay pengiriman	5	Seluruh SMS diterima
Modul GPS	Koordinat lintang-bujur pada serial monitor	16 pembacaan statis	Koordinat diterima dan stabil

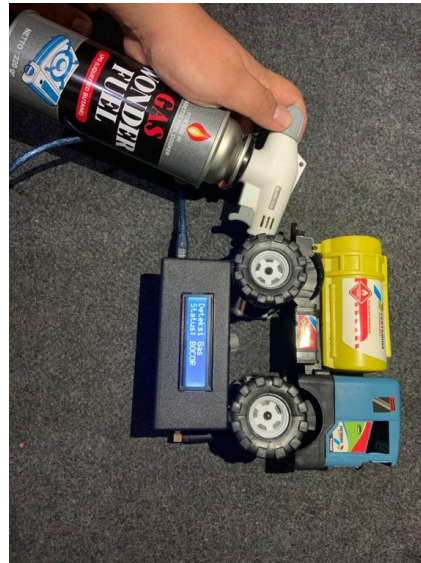
Sumber: Disusun oleh penulis

Data dianalisis secara deskriptif dengan rerata (M), simpangan baku (SD), dan koefisien variasi (CV). Hubungan jarak dan waktu deteksi dianalisis dengan regresi linear. Hasil uji fungsional dilaporkan sebagai jumlah positif benar, negatif benar, positif palsu, dan negatif palsu, disertai selang kepercayaan 95% eksak (Clopper–Pearson). Latensi dari deteksi hingga notifikasi diperkirakan dengan menjumlahkan rerata waktu deteksi dan rerata delay SMS karena keduanya diukur secara terpisah. Identifikasi bahaya dilakukan secara kualitatif berdasarkan pustaka; penilaian risiko dengan matriks kemungkinan-keparahan tidak dilakukan pada penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Realisasi Prototipe dan Uji Fungsional

Prototipe yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 4. Unit elektronik ditempatkan dalam kotak terpisah berisi Arduino Uno, modul GSM, modul GPS, buzzer, dan LCD, sedangkan sensor MQ-6 dihubungkan ke area katup miniatur. Pada kondisi uji, LCD menampilkan “Deteksi Gas – Status: BOCOR” ketika gas disemprotkan.



Gambar 4. Pengujian prototipe pada miniatur truk tangki menggunakan gas butana kaleng
Sumber: Dokumentasi penulis

Hasil uji fungsional disajikan pada Tabel 4. Pada dua percobaan tanpa gas, sensor tidak memicu alarm dan LCD menampilkan AMAN. Pada tiga percobaan dengan gas, buzzer menyala, LCD menampilkan BOCOR, dan SMS berisi koordinat terkirim. Seluruh keluaran sesuai logika rancangan, yaitu 3 positif benar dan 2 negatif benar, tanpa positif atau negatif palsu. Namun, jumlah percobaan ini terlalu kecil untuk menyimpulkan keandalan. Selang kepercayaan 95% untuk sensitivitas (3/3) adalah 29,2–100%, dan untuk spesifisitas (2/2) adalah 15,8–100%. Uji alarm palsu terhadap gas pengganggu, seperti asap, uap bensin atau solar, alkohol, dan gas buang, belum dilakukan, padahal sensor MOS memiliki sensitivitas silang (Goel et al., 2023).

Tabel 4. Hasil uji fungsional sistem

Percobaan ke-	Pemberian gas	MQ-6	Buzzer	LCD	SMS	Koordinat GPS
1	Tidak	OFF	OFF	AMAN	–	–
2	Tidak	OFF	OFF	AMAN	–	–
3	Ya	ON	ON	BOCOR	Terkirim	Diterima
4	Ya	ON	ON	BOCOR	Terkirim	Diterima
5	Ya	ON	ON	BOCOR	Terkirim	Diterima
Rekap: positif benar 3, negatif benar 2, positif palsu 0, negatif palsu 0						

Sumber: Hasil olahan data primer

Waktu Deteksi Sensor MQ-6

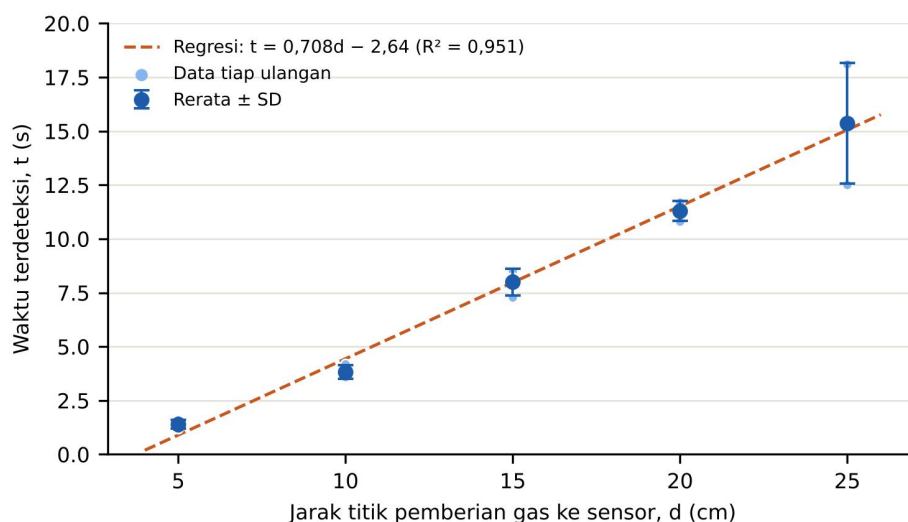
Hasil uji waktu deteksi disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 5. Rerata waktu deteksi meningkat dari 1,40 s pada jarak 5 cm menjadi 15,37 s pada jarak 25 cm. Regresi linear terhadap 15 data menghasilkan $t = 0,708d - 2,64$ dengan $R^2 = 0,951$. Artinya, setiap penambahan jarak 1 cm menambah waktu deteksi sekitar 0,71 s dalam rentang 5–25 cm. Persamaan ini hanya berlaku pada rentang tersebut karena intersep negatif tidak bermakna fisik. Pola ini konsisten dengan proses difusi gas dari

titik semprot menuju sensor. Variabilitas terbesar terjadi pada 25 cm (SD 2,80 s; CV 18,2%), kemungkinan karena penyemprotan manual dan aliran udara ruang yang tidak dikendalikan. Sebagai pembandingan, Pamungkas et al. (2024) melaporkan waktu uji rata-rata 9,56 s pada sistem MQ-6 rumah tangga dengan kondisi uji yang berbeda.

Tabel 5. Waktu deteksi sensor MQ-6 terhadap jarak sumber gas

Jarak (cm)	Waktu terdeteksi (s)			M (s)	SD (s)	CV (%)
	Uji 1	Uji 2	Uji 3			
5	1,4	1,6	1,2	1,40	0,20	14,3
10	3,7	4,2	3,6	3,83	0,32	8,4
15	8,5	7,3	8,2	8,00	0,62	7,8
20	11,4	10,8	11,7	11,30	0,46	4,1
25	15,5	18,1	12,5	15,37	2,80	18,2

Sumber: Hasil olahan data primer



Gambar 5. Hubungan jarak sumber gas dan waktu deteksi

Sumber: Hasil olahan data primer

Untuk aplikasi truk tangki, ukuran yang lebih bermakna adalah kurva respons terhadap konsentrasi, waktu respons T_{90} , waktu pemulihan, serta pengaruh suhu, kelembapan, angin, dan getaran. Kelembapan dan suhu diketahui menggeser respons sensor MOS (Abdullah et al., 2022; Panzardi et al., 2025). Pada kendaraan yang bergerak, aliran udara di sekitar tangki dapat mengencerkan atau menjauhkan uap dari sensor sehingga waktu deteksi di lapangan berpotensi lebih lama daripada hasil laboratorium.

Pengiriman SMS dan Perkiraan Latensi

Hasil uji pengiriman SMS disajikan pada Tabel 6. Kelima pesan terkirim dengan rerata delay 7,86 s (SD 0,51 s; rentang 7,2–8,5 s); nilai ini mengoreksi angka 7,8 s pada versi sebelumnya. Delay tersebut bergantung pada operator, kekuatan sinyal, dan beban jaringan, serta SMS tidak menjamin penerimaan pesan. SIM800L hanya mendukung jaringan 2G. Layanan 2G di Indonesia belum dihentikan secara nasional, tetapi salah satu operator telah mematikannya secara bertahap per klaster (Rayana,

2026). Karena itu, modul 4G/LTE-M dengan konfirmasi penerimaan, dengan SMS sebagai cadangan, lebih sesuai untuk pengembangan berikutnya.

Tabel 6. Hasil uji pengiriman SMS dengan modul SIM800L

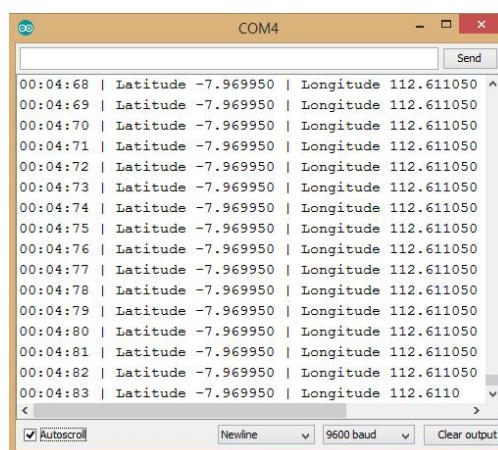
Percobaan ke-	Status pengiriman	Delay pengiriman (s)
1	Terkirim	8,5
2	Terkirim	7,8
3	Terkirim	8,2
4	Terkirim	7,6
5	Terkirim	7,2
M ± SD	5/5 terkirim	7,86 ± 0,51

Sumber: Hasil olahan data primer

Waktu dari deteksi hingga notifikasi tidak diukur langsung, tetapi dapat diperkirakan. Pada jarak 25 cm, jumlah rerata waktu deteksi dan rerata delay SMS adalah $15,37 + 7,86 \approx 23,2$ s; kombinasi nilai terlama yang teramati mencapai $18,1 + 8,5 = 26,6$ s. Pada kecepatan 60 km/jam, truk menempuh sekitar 387–443 m dalam selang waktu tersebut. Dengan demikian, klaim “real time” pada versi sebelumnya tidak dapat dipertahankan. Alarm lokal di kabin merupakan peringatan tercepat bagi pengemudi, sedangkan SMS lebih berperan sebagai pelaporan lokasi kepada pihak ketiga.

Pembacaan Koordinat GPS

Keluaran modul GPS pada uji statis disajikan pada Gambar 6. Selama 16 pembacaan berturut-turut, koordinat yang terbaca tetap, yaitu lintang $-7,969950$ dan bujur $112,611050$. Hasil ini menunjukkan keluaran yang stabil pada kondisi diam, tetapi tidak membuktikan akurasi. Pembanding titik referensi, jumlah satelit, HDOP, waktu *time to first fix*, dan uji saat bergerak belum tersedia. Karena itu, label “akurat” pada versi sebelumnya diganti dengan “koordinat diterima”. Galat posisi perlu diukur dalam meter pada kondisi terbuka, di bawah kanopi, dan di dalam kabin logam.



Gambar 6. Keluaran modul GPS pada serial monitor (uji statis)

Sumber: Dokumentasi penulis

Identifikasi Bahaya dan Posisi Alat dalam Pengendalian

Identifikasi bahaya kebocoran LPG pada truk tangki dan posisi prototipe dalam pengendaliannya disajikan pada Tabel 7. Penilaian risiko pada versi sebelumnya, yang menggunakan skala tiga tingkat tanpa matriks dan rujukan standar, dihapus. Penilaian itu menghasilkan kategori yang tidak konsisten, misalnya ledakan dinilai “tidak mungkin”, padahal dampaknya kematian. Penilaian risiko formal, misalnya mengacu pada SNI ISO 31000 dengan matriks lima tingkat dan data insiden, beserta risiko residual setelah pengendalian, direkomendasikan untuk penelitian lanjutan.

Tabel 7. Identifikasi bahaya kebocoran LPG pada truk tangki dan peran prototipe

Bahaya	Mekanisme dan dampak	Pengendalian yang relevan	Peran prototipe
Kebocoran uap dari katup, flange, atau selang	Uap lebih berat dari udara terkumpul di permukaan; asfiksia di ruang tertutup	Inspeksi dan uji kebocoran berkala; perawatan katup dan selang	Deteksi dan peringatan jika uap mencapai sensor
Penyalan awan uap (flash fire/VCE)	Luka bakar dan tekanan ledak berlebih (K. Wang et al., 2023)	Kontrol sumber nyala, grounding/antistatik, peralatan listrik terproteksi Ex	Memberi waktu menjauhkan sumber nyala; perangkat sendiri berpotensi menjadi sumber nyala
Jet fire dari kebocoran bertekanan	Radiasi panas di sekitar titik bocor	Katup penutup darurat, APAR, SOP tanggap darurat	Tidak mencegah; notifikasi lokasi membantu respons
BLEVE akibat tangki terpapar api	Bola api dan fragmen tangki (Y. Wang et al., 2020)	Katup pelepas tekanan, evakuasi radius aman	Tidak langsung
Kontak LPG cair saat bongkar-muat	Luka dingin (cold burn)	APD dan prosedur bongkar-muat	Tidak relevan
Tabrakan atau terguling	Kebocoran besar (Ma et al., 2020)	Manajemen pengemudi, kecepatan, dan rute	Notifikasi lokasi kepada pihak ketiga

Sumber: Disusun dari pustaka

Tabel 7 menunjukkan bahwa prototipe hanya berfungsi sebagai sarana deteksi dan peringatan; alat ini tidak mencegah kebocoran. Dalam hierarki pengendalian, alat ini perlu dilengkapi dengan inspeksi dan uji kebocoran berkala, katup penutup darurat, grounding, APAR, pelatihan pengemudi, dan prosedur tanggap darurat. Prosedur tersebut setidaknya mencakup menghentikan kendaraan di tempat aman, mematikan mesin dan sumber nyala, menjauh dari kendaraan, serta melapor ke petugas atau pusat kendali yang ditetapkan dalam prosedur tanggap darurat perusahaan.

Faktor Manusia, Keselamatan Perangkat, dan Keterbatasan

Dari sisi faktor manusia, LCD yang harus dilihat saat mengemudi berpotensi mengalihkan perhatian pengemudi (Lipovac et al., 2017). Karena itu, peringatan utama sebaiknya berupa bunyi. Kemampuan seseorang mendeteksi bunyi peringatan dipengaruhi tingkat kebisingan lingkungan dan karakter bunyinya (Hsieh et al., 2021), sedangkan tingkat bunyi buzzer di kabin truk belum diukur. Dari sisi keselamatan perangkat, elemen pemanas MQ-6 memiliki daya hingga 950 mW (Zhengzhou Winsen Electronics Technology, 2014) dan beroperasi pada suhu tinggi. Elemen ini berpotensi menjadi sumber penyalan bila berada dalam atmosfer mudah terbakar. Penerapan nyata memerlukan perangkat bersertifikat proteksi ledakan (seri IEC

60079/SNI IEC 60079) atau sensor katalitik/inframerah bersertifikat, sebagaimana diterapkan pada sensor industri bersertifikat ATEX (Moser et al., 2025).

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, yaitu (1) pengujian dilakukan pada miniatur dalam kondisi statis di ruangan; (2) gas uji berupa butana kaleng tanpa pengukuran konsentrasi; (3) jumlah ulangan kecil; (4) sensor tidak dikalibrasi ke ppm atau %LEL; (5) uji alarm palsu, uji GPS saat bergerak, dan pengukuran langsung latensi dari deteksi hingga SMS diterima belum dilakukan; serta (6) validasi ahli dan uji lapangan belum dilaksanakan. Karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan kelayakan konsep pada skala laboratorium, bukan bukti peningkatan keselamatan pada truk tangki yang sebenarnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan prototipe sistem deteksi dini kebocoran gas berbasis Arduino Uno yang memadukan sensor MQ-6, alarm buzzer, LCD, modul GPS, dan notifikasi SMS. Pada uji fungsional skala laboratorium, seluruh lima percobaan menghasilkan keluaran yang sesuai rancangan. Waktu deteksi meningkat linear terhadap jarak sumber gas, dari 1,40 s pada 5 cm hingga 15,37 s pada 25 cm ($R^2 = 0,951$), dan rerata delay SMS adalah 7,86 s. Dengan demikian, perkiraan waktu dari deteksi hingga notifikasi pada jarak 25 cm sekitar 23 s. Modul GPS menghasilkan koordinat yang stabil pada uji statis, tetapi akurasi belum terukur. Prototipe berfungsi sebagai alat deteksi dan peringatan, bukan pencegah kebocoran, dan belum layak dipasang pada kendaraan sebelum dilakukan kalibrasi, uji lapangan, dan sertifikasi proteksi ledakan.

SARAN

Penelitian lanjutan disarankan untuk (1) mengkalibrasi sensor terhadap LPG campuran propana-butana pada beberapa tingkat konsentrasi dan mengukur T_{90} , waktu pemulihan, serta pengaruh suhu, kelembapan, angin, dan getaran; (2) menambah jumlah ulangan dan menguji alarm palsu terhadap gas pengganggu; (3) menempatkan beberapa sensor pada titik potensi bocor; (4) menggunakan sensor dan *enclosure* bersertifikat proteksi ledakan dengan *rating* IP yang sesuai; (5) mengganti modul 2G dengan modul 4G/LTE-M yang memiliki konfirmasi penerimaan, catu daya cadangan, *watchdog*, dan uji mandiri sensor; (6) mengintegrasikan alat dengan katup penutup darurat dan pusat kendali armada; serta (7) melakukan uji lapangan pada kendaraan nyata, mengukur tingkat bunyi alarm di kabin, dan menilai risiko residual sebelum dan sesudah alat dipasang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan atas dukungan selama penelitian dan penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, A. N., Kamarudin, K., Kamarudin, L. M., Adom, A. H., Mamduh, S. M., Mohd Juffry, Z. H., & Bennetts, V. H. (2022). Correction model for metal oxide sensor drift caused by ambient temperature and humidity. *Sensors*, 22(9), 3301. <https://doi.org/10.3390/s22093301>

- Ardila-Suarez, C., Lacoursière, J.-P., Soucy, G., & Rego de Vasconcelos, B. (2025). Consequence analysis of LPG-related hazards: Ensuring safe transitions to cleaner energy. *Fuels*, 6(2), 45. <https://doi.org/10.3390/fuels6020045>
- Batarlienė, N. (2020). Essential safety factors for the transport of dangerous goods by road: A case study of Lithuania. *Sustainability*, 12(12), 4954. <https://doi.org/10.3390/su12124954>
- Bęczkowska, S., & Zysińska, M. (2021). The importance of the human factor in safety for the transport of dangerous goods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 7525. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147525>
- Dash, A., Bandopadhyay, S., Samal, S. R., & Poulkov, V. (2023). AI-enabled IoT framework for leakage detection and its consequence prediction during external transportation of LPG. *Sensors*, 23(14), 6473. <https://doi.org/10.3390/s23146473>
- Furuta, D., Wilson, B., Presto, A. A., & Li, J. (2024). Design and evaluation of a low-cost sensor node for near-background methane measurement. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(7), 2103–2121. <https://doi.org/10.5194/amt-17-2103-2024>
- Goel, N., Kunal, K., Kushwaha, A., & Kumar, M. (2023). Metal oxide semiconductors for gas sensing. *Engineering Reports*, 5(6), e12604. <https://doi.org/10.1002/eng2.12604>
- Hsieh, M.-C., Chen, H.-J., Tong, M.-L., & Yan, C.-W. (2021). Effect of environmental noise, distance and warning sound on pedestrians' auditory detectability of electric vehicles. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 9290. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179290>
- Kementerian Perhubungan. (2019). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 60 Tahun 2019 tentang Penyelenggaraan Angkutan Barang dengan Kendaraan Bermotor di Jalan*. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- Lipovac, K., Đerić, M., Tešić, M., Andrić, Z., & Marić, B. (2017). Mobile phone use while driving—literary review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 47, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.04.015>
- Ma, C., Zhou, J., & Yang, D. (2020). Causation analysis of hazardous material road transportation accidents based on the ordered logit regression model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1259. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041259>
- Miquel-Ibarz, A., Burgués, J., & Marco, S. (2022). Global calibration models for temperature-modulated metal oxide gas sensors: A strategy to reduce calibration costs. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 350, 130769. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130769>
- Moser, H., Waclawek, J. P., Pölz, W., & Lendl, B. (2025). ATEX-certified, FPGA-based three-channel quantum cascade laser sensor for sulfur species detection in petrochemical process streams. *Sensors*, 25(3), 635. <https://doi.org/10.3390/s25030635>
- Oo, Z. L. (2021). IoT based LPG gas level detection & gas leakage accident prevention with alert system. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(4), 404–409. <https://doi.org/10.17694/bajece.946789>
- Pamungkas, D. R., Setiawan, A., & Widiyanto, A. (2024). Design of Arduino-based LPG gas leak detection tool using MQ-6 sensor. *Innovation, Technology, and Entrepreneurship Journal*, 1(1), 21–27. <https://doi.org/10.31603/itej.10687>
- Panzardi, E., Fort, A., Vignoli, V., Cappelli, I., Gaioni, L., Verzeroli, M., Dello Iacono, S., & Flammini, A. (2025). Assessing BME688 sensor performance under controlled outdoor-like environmental conditions. *Sensors*, 25(23), 7102. <https://doi.org/10.3390/s25237102>
- Rahmalisa, U., Febriani, A., & Irawan, Y. (2021). Detector leakage gas LPG based on Telegram notification using Wemos D1 and MQ-6 sensor. *Journal of Robotics and Control*, 2(4), 287–291. <https://doi.org/10.18196/jrc.2493>

- Rayana, U. (2026, Oktober 15). *Setelah 3G, haruskah operator selular juga matikan 2G?* Selular.ID. <https://selular.id/2026/10/setelah-3g-haruskah-operator-selular-juga-matikan-2g/>
- Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 140.
- Rimbawati, R., Setiadi, H., Ananda, R., & Ardiansyah, M. (2019). Perancangan alat pendeteksi kebocoran tabung gas LPG dengan menggunakan sensor MQ-6 untuk mengatasi bahaya kebakaran. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 4(2), 53–58. <https://doi.org/10.30743/jet.v4i2.1616>
- Stojanović, N., Bošković, B., Petrović, M., Grujić, I., & Abdullah, O. I. (2023). The impact of accidents during the transport of dangerous good, on people, the environment, and infrastructure and measures for their reduction: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 32288–32300. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25470-2>
- Sugiyono. (2015). *Metode penelitian dan pengembangan (Research and Development/R&D)*. Alfabeta.
- Wang, K., Liu, Y., Wang, H., Liu, X., Jiao, Y., & Wu, Y. (2023). Dynamic process and damage evaluation subject to explosion consequences resulting from a LPG tank trailer accident. *Processes*, 11(5), 1514. <https://doi.org/10.3390/pr11051514>
- Wang, Y., Gu, X., Xia, L., Pan, Y., Ni, Y., Wang, S., & Zhou, W. (2020). Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68, 104319.
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology. (2014). *MQ-6 flammable gas sensor manual* (Ver. 1.3). <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-6%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>