

Rancang Bangun Prototipe Sistem Peringatan Dini Keselamatan Ruang Kerja Berbasis Multisensor dan Hermes Agent melalui Telegram Bot

Gultom Bivan Supra Agung¹, Ahmad Faridh²

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa

Jl. Kalibaru Timur, Kelurahan Kalibaru, Medan Satria, Kota Bekasi, Indonesia

dutabangsa@sttdb.ac.id

Abstrak—Kebocoran gas dan asap pada ruang tertutup memerlukan peringatan cepat. Sistem pengawasan berbasis kamera merekam terus-menerus sehingga boros sumber daya, sedangkan sistem bersensor tunggal mudah menghasilkan alarm palsu. Penelitian ini merancang dan membangun prototipe sistem peringatan dini berbasis Raspberry Pi 4 Model B yang menggabungkan sensor gas MQ-2 melalui pengubah analog ke digital ADS1115, sensor gerakan PIR HC-SR501, dan kamera USB. Citra diambil hanya ketika kadar gas melampaui ambang sekaligus terdapat gerakan, sehingga komputasi dan biaya pemanggilan model hanya timbul pada peristiwa nyata. *Daemon* Python mengoordinasikan proses melalui mesin keadaan, memverifikasi kepatuhan masker dengan model *vision* GPT-4o-mini melalui OpenRouter, memutar pesan suara peringatan, dan mengirim notifikasi bergambar melalui Telegram Bot, sedangkan Hermes Agent berperan sebagai antarmuka tanya jawab bahasa alami. Ambang bahaya ditetapkan secara empiris pada 10400 LSB setelah pengukuran memperlihatkan selang kosong selebar 2875 LSB antara sebaran udara bersih dan udara berasap. Uji pembandingan terhadap tujuh jenis sumber gas memperlihatkan seluruhnya melampaui ambang tersebut, termasuk gas butana yang tidak mengandung partikel asap sama sekali. Dari empat belas kejadian yang tercatat pada lima skenario pengujian, seluruh keputusan tepat tanpa positif palsu maupun negatif palsu sehingga melampaui target ketepatan 85 persen. Rata-rata latensi ujung ke ujung 11,6 detik terhadap target 15 detik. Pengujian juga memperlihatkan bahwa sensor gas dan sensor gerak tidak sepenuhnya saling bebas, namun seluruh kejadian tersebut disaring oleh lapisan verifikasi visual sehingga tidak menghasilkan alarm palsu.

Kata kunci—sistem peringatan dini, multisensor, Raspberry Pi, AI Agent, Telegram Bot, deteksi kepatuhan masker.

I. PENDAHULUAN

Keselamatan ruang menjadi aspek penting dalam pengelolaan bangunan komersial, fasilitas industri, laboratorium penelitian, hingga lingkungan tempat tinggal. Insiden seperti kebakaran akibat hubung singkat listrik, kebocoran gas pada dapur dan ruang penyimpanan bahan

kimia, serta penyusupan ke area yang seharusnya tidak terjamah kerap menelan korban jiwa beserta kerugian material yang besar. Kondisi tersebut umumnya memburuk ketika bahaya tidak terdeteksi sejak dini, terutama saat ruangan tidak diawasi [1]. Sistem peringatan dini dipahami sebagai rangkaian kemampuan untuk menghasilkan dan menyebarkan informasi peringatan yang tepat waktu sehingga pihak yang terancam dapat bersiap dan bertindak [2].

Sistem pengawasan konvensional yang umum dipasang masih memiliki keterbatasan nyata. Kamera *Closed-Circuit Television* (CCTV) merekam terus-menerus sehingga boros sumber daya dan bergantung pada pengamatan manusia. Detektor asap berdiri sendiri hanya membunyikan alarm di lokasi pemasangan sehingga tidak efektif jika tidak ada orang di sekitarnya. Sistem keamanan terintegrasi berbasis *cloud* umumnya berbiaya tinggi dan menimbulkan kekhawatiran privasi karena data sensor terus dikirim ke peladen pihak ketiga.

Ekosistem *Internet of Things* (IoT) menawarkan peluang membangun sistem peringatan dini yang lebih terjangkau dan cerdas. Platform komputasi tepi seperti Raspberry Pi 4 sudah cukup mampu menggabungkan masukan beberapa sensor sekaligus, sehingga peluang alarm palsu berkurang [3]. Penggabungan data beberapa sensor memang telah lama dikenal mampu menurunkan ketidakpastian keputusan dibanding pemakaian sensor tunggal [4]. Kemajuan kecerdasan buatan turut membuka opsi baru untuk pengambilan keputusan multisensor, terutama dengan munculnya *Large Language Model* (LLM) yang difungsikan sebagai *Artificial Intelligence* (AI) Agent. Tidak seperti logika berbasis aturan yang kaku, AI Agent dengan kemampuan *tool calling* mampu menafsirkan kombinasi data sensor secara kontekstual.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas sistem peringatan dini berbasis IoT. Referensi [5] mengembangkan pemodelan lingkungan rumah pintar untuk pencegahan kebakaran dengan notifikasi melalui *Global System for Mobile Communications* (GSM), namun keputusannya masih bertumpu pada logika ambang tetap tanpa verifikasi visual. Referensi [6] menggunakan Raspberry Pi dengan sensor PIR dan kamera untuk sistem keamanan rumah dengan notifikasi Telegram, tetapi belum menggabungkan deteksi gas maupun analisis isi citra secara otomatis. Referensi [7] merancang sistem manajemen keselamatan kebakaran yang menggabungkan sensor suhu, sensor asap

MQ-2, dan sensor PIR dengan pendekatan berbasis aturan; pendekatan ini memberikan latensi rendah namun kurang fleksibel terhadap skenario yang tidak terdefinisi sebelumnya. Referensi [8] memperkenalkan pendekatan *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk deteksi api pada citra nyata, tetapi modelnya bersifat khusus untuk satu tugas dan tidak memiliki kemampuan penalaran umum.

Berdasarkan tinjauan tersebut, kesenjangan yang menjadi peluang kontribusi penelitian ini adalah belum adanya integrasi AI Agent berbasis LLM sebagai komponen pengambil keputusan multisensor untuk sistem peringatan dini keselamatan ruang, khususnya dengan kombinasi MQ-2, PIR, dan kamera USB pada platform Raspberry Pi 4 berbiaya terjangkau. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun prototipe tersebut serta mengukur ketepatan keputusan dan latensi ujung ke ujungnya.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini memakai metode perancangan yang mencakup tahap perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, integrasi, dan pengujian.

A. Perancangan Perangkat Keras

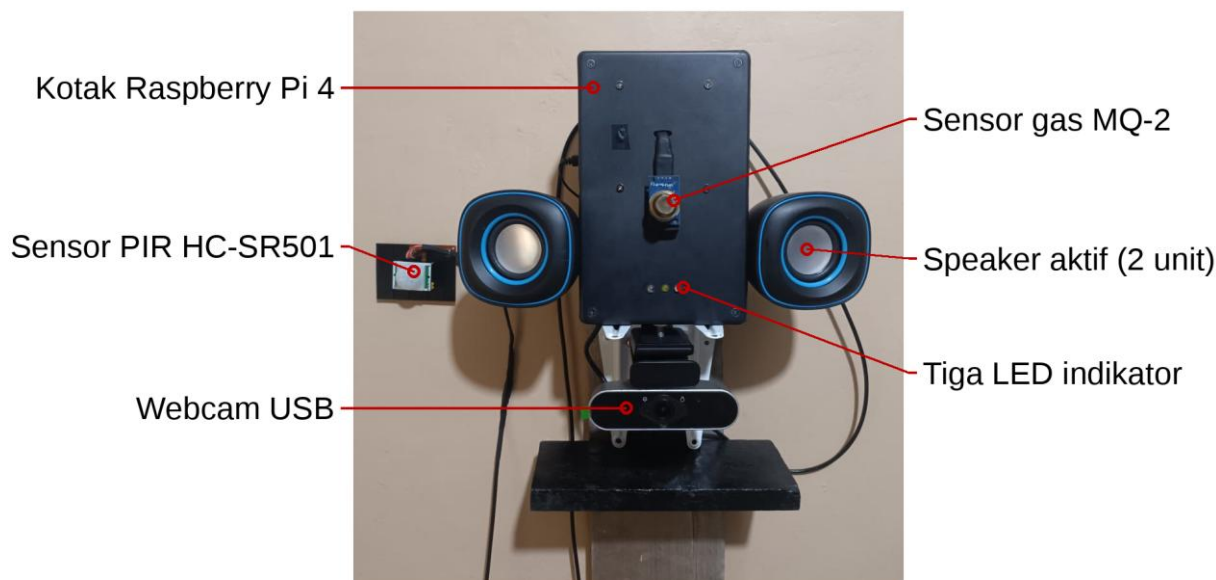
Unit pemroses berupa Raspberry Pi 4 Model B dengan RAM 8 GB yang menjalankan Raspberry Pi OS Bookworm

64-bit [9]. Sensor gas MQ-2 [10] dicatu 5 V dan keluaran analognya dihubungkan ke kanal A0 modul ADS1115, sebuah pengubah analog ke digital 16 bit yang berkomunikasi melalui antarmuka I²C pada alamat 0x48. Modul ADS1115 dicatu 3,3 V dari header dan dikonfigurasi pada skala penguatan 4,096 V yang memberikan resolusi 125 μ V per cacahan [11].

Keluaran analog MQ-2 pada dasarnya merupakan keluaran sebuah pembagi tegangan. Lapisan SnO₂ sensor berlaku sebagai resistansi R_s yang menurun ketika kadar gas naik, dan diseri dengan resistor beban R_L pada modul, sehingga

$$V_{AO} = V_c \times \frac{R_L}{R_s + R_L}$$

dengan V_c sebesar 5 V. Sensor PIR HC-SR501 dicatu 5 V dengan keluaran digital bertaraf 3,3 V yang dihubungkan langsung ke GPIO 17, sedangkan kamera USB dihubungkan ke port USB 3.0. Tiga lampu indikator LED dengan resistor pembatas arus 220 Ω dipasang pada GPIO 18, 27, dan 22. Aktuator peringatan lokal berupa *speaker* aktif berpenguat internal. Seluruh sambungan disolder pada PCB lubang dengan jalur catu dan *ground* bersama. Prototipe yang telah dirakit beserta penanda tiap komponennya ditampilkan pada Gambar. 1.

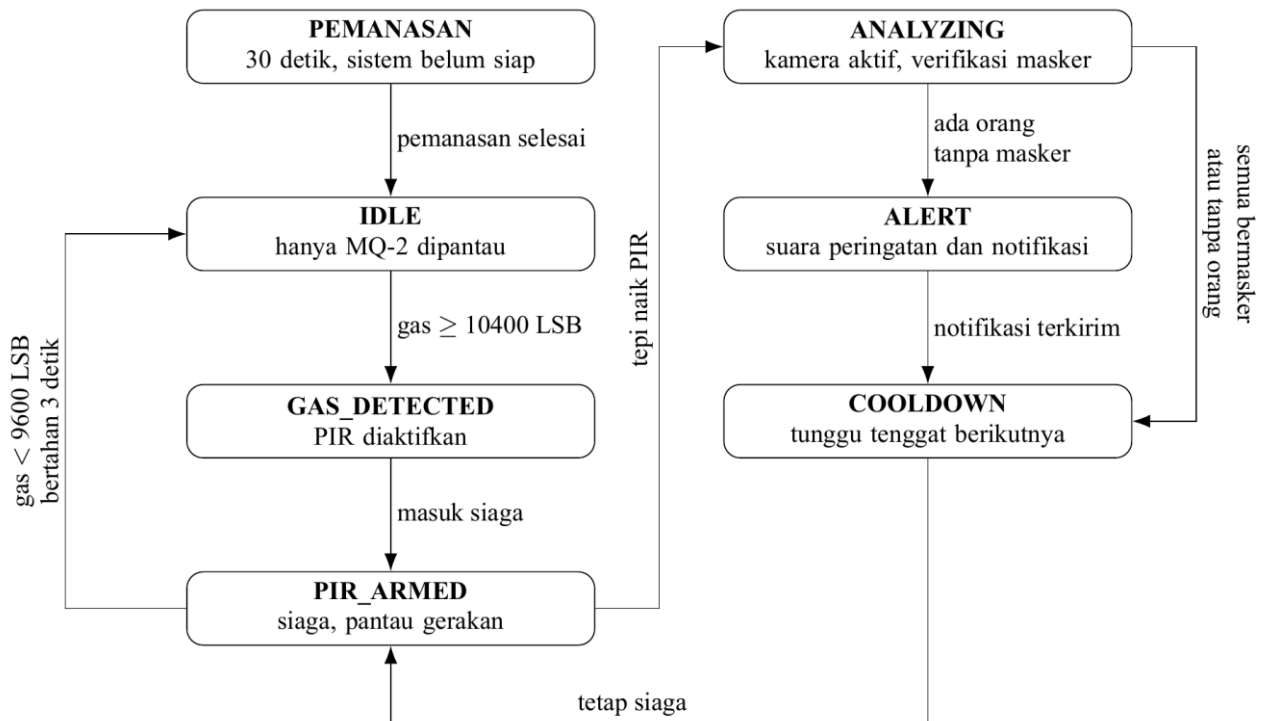


Gambar. 1 Prototipe yang telah dirakit beserta penanda komponen

B. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak disusun modular dalam bahasa Python dan dijalankan sebagai *daemon* melalui unit systemd. Logika keputusan dimodelkan sebagai mesin keadaan berbasis kejadian dengan tujuh keadaan, yaitu PEMANASAN, IDLE, GAS_DETECTED, PIR_ARMED, ANALYZING, ALERT, dan COOLDOWN. Keadaan ALERT hanya dimasuki ketika verifikasi visual menemukan

orang tanpa masker, dan pada keadaan itulah suara peringatan dibunyikan serta notifikasi dikirim. Kamera hanya diaktifkan ketika kadar gas melampaui ambang sekaligus terdapat gerakan, sehingga akuisisi citra dan pemanggilan model tidak berjalan terus-menerus. Keseluruhan keadaan dan peralihan antarkeadaan digambarkan pada Gambar. 2.



Gambar. 2 Diagram keadaan sistem peringatan dini

Verifikasi kepatuhan masker dilakukan dengan mengirim citra ke model *vision* GPT-4o-mini melalui OpenRouter pada mode detail rendah, sehingga konsumsi token ditekan hingga sekitar 85 token per gambar. Hermes Agent [12] berperan sebagai antarmuka tanya jawab bahasa alami melalui Telegram, terpisah dari jalur peringatan waktu nyata. Seluruh kejadian dicatat ke basis data SQLite untuk keperluan penelusuran.

C. Rancangan Pengujian

Pengujian mencakup empat bagian. Pertama, uji fungsional tiap komponen meliputi kalibrasi pembacaan MQ-2 pada udara bersih dan udara berasap, uji pembandingan terhadap tujuh jenis sumber gas, jangkauan sensor PIR, waktu akuisisi citra, dan keluaran suara *speaker*. Kedua, pengukuran ketepatan keputusan. Ketiga, pengukuran latensi ujung ke ujung yang dipecah menjadi tiga tahap, yaitu

akuisisi citra, verifikasi *vision*, dan pengiriman notifikasi. Keempat, lima skenario multisensor yang mewakili kombinasi kondisi gas, kehadiran orang, dan status kepatuhan masker. Sumber asap terkontrol berupa batang dupa dipakai untuk mensimulasikan kebakaran skala kecil di dalam kotak peraga.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penetapan Ambang Deteksi Gas

Pengukuran pembacaan MQ-2 melalui ADS1115 pada tiga kondisi udara disajikan pada Tabel I. Tiap kondisi diambil 59 sampel berjarak satu detik. Nilai yang dilaporkan adalah rata-rata, dengan angka terendah dan tertinggi di dalam kurung.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN SENSOR MQ-2 DENGAN ASAP TERKONTROL

No	Kondisi Uji	Rata-rata ADC (LSB)	Tegangan (VDC)	Status
1	Udara bersih	8739 (8526–8956)	1,092	Tidak terdeteksi
2	Udara berasap	14479 (11831–17689)	1,810	Terdeteksi
3	Pascaventilasi	8418 (8371–8464)	1,052	Tidak terdeteksi

Kedua sebaran terpisah tanpa tumpang tindih. Pembacaan tertinggi pada udara bersih adalah 8956 LSB, sedangkan pembacaan terendah pada udara berasap adalah 11831 LSB, sehingga di antara keduanya terdapat selang kosong selebar 2875 LSB yang tidak pernah ditempati satu pun sampel. Ambang bahaya ditetapkan pada titik tengah selang tersebut,

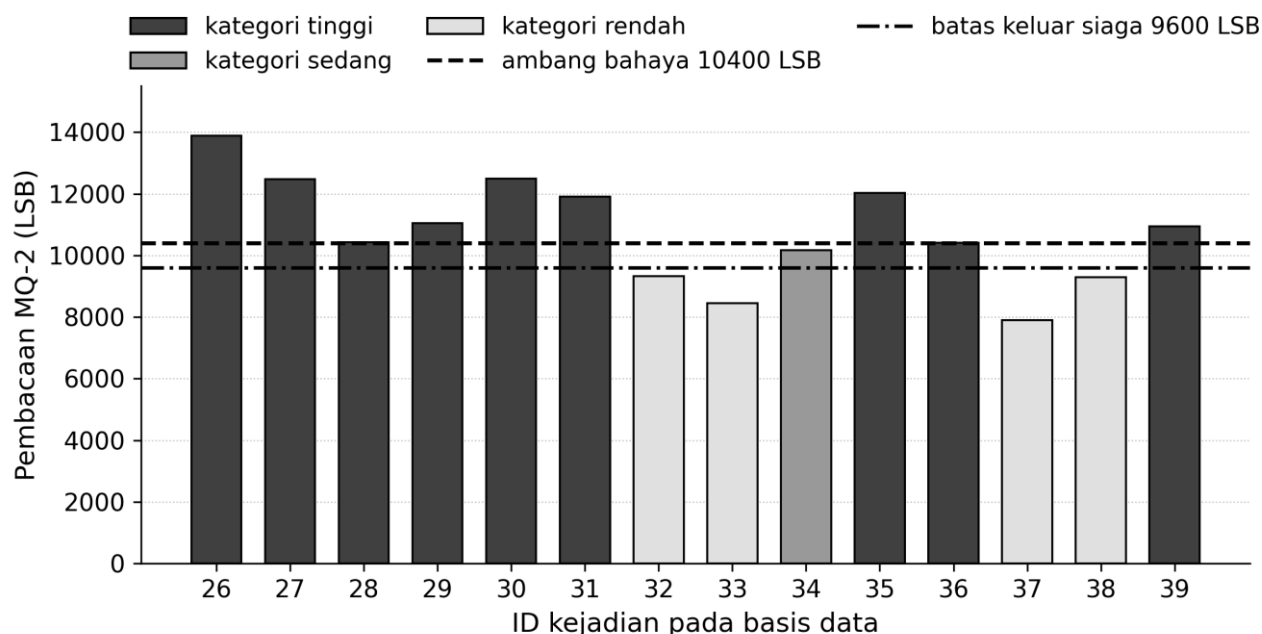
$$\frac{8956 + 11831}{2} \approx 10400 \text{ LSB}$$

setara 1,300 V, agar berjarak seimbang terhadap kedua sebaran. Karena tidak ada satu pun pembacaan udara bersih yang mendekati nilai itu, tidak terjadi positif palsu selama

pengujian. Perlu ditegaskan bahwa ambang 10400 LSB berlaku untuk rangkaian dan lingkungan penelitian ini saja, bukan baku mutu udara.

Pembacaan pascaventilasi justru lebih rendah sekaligus jauh lebih rapat daripada udara bersih di awal sesi. Hal itu menunjukkan bahwa perekaman udara bersih di awal masih mengandung sisa pencemaran dari kegiatan sebelumnya, sehingga ventilasi antarpercobaan menjadi bagian yang perlu dari prosedur pengujian sensor gas di ruang tertutup.

Sebaran pembacaan MQ-2 terhadap ambang deteksi selama sesi pengujian ditampilkan pada Gambar. 3.



Gambar. 3 Pembacaan sensor MQ-2 terhadap ambang deteksi pada sesi pengujian

B. Tanggapan terhadap Tujuh Jenis Sumber Gas

Ambang 10400 LSB ditetapkan dari satu jenis sumber asap, sehingga perlu diuji apakah nilai yang terbaca bergantung pada jenis sumber gas atau hanya pada ada tidaknya gas. Pengujian pembandingan dilakukan terhadap tujuh kondisi, seluruhnya pada jarak 10 sentimeter dari

lubang sensor dan berdurasi 15 detik. Antara satu jenis dan jenis berikutnya, pembacaan ditunggu hingga kembali ke nilai udara bersih, sebab lapisan timah dioksida melepaskan molekul yang terserap secara bertahap. Hasilnya disajikan pada

Tabel II.

TABEL II

TANGGAPAN MQ-2 TERHADAP TUJUH JENIS SUMBER GAS SELAMA 15 DETIK

No	Kondisi Uji	Rata-rata (LSB)	Tegangan (VDC)	Status
1	Udara bersih	7176 (7116–7248)	0,897	Tidak terdeteksi
2	Asap rokok	10747 (7627–18211)	1,343	Terdeteksi
3	Asap kertas	10861 (10094–11500)	1,358	Terdeteksi
4	Uap alkohol	11237 (7431–15126)	1,405	Terdeteksi
5	Asap obat nyamuk bakar	12645 (11255–13336)	1,581	Terdeteksi
6	Gas butana	12762 (11869–13794)	1,595	Terdeteksi
7	Asap knalpot	14434 (13940–14928)	1,804	Terdeteksi

Ketujuh sumber melampaui ambang, sehingga ambang yang ditetapkan dari satu jenis asap berlaku pula untuk jenis lain. Dua baris menuntut perhatian khusus.

Gas butana memberikan pembacaan 12762 LSB, setara dengan sumber berasap, meskipun tidak mengandung partikel asap sama sekali. Hal ini menegaskan bahwa yang dideteksi MQ-2 adalah gas mudah terbakar, bukan asapnya. Sensor menyatakan ada bahan mudah terbakar di udara, tetapi tidak dapat menyatakan bahan apa. Inilah alasan pembacaan dilaporkan dalam satuan LSB dan volt, bukan ppm.

Sebaliknya, asap kertas menghasilkan pembacaan paling rendah di antara seluruh sumber pembakaran, yaitu 10861 LSB atau hanya 461 LSB di atas ambang, padahal pembakaran kertas paling mendekati kebakaran ruangan yang sebenarnya. Kedua temuan tersebut mengarah pada simpulan yang sama dengan Skenario C pada subbab

berikutnya: sensor gas tidak dapat dijadikan penentu tunggal, dan lapisan verifikasi visual diperlukan untuk memberi konteks.

Lebar rentang juga berbeda menurut bentuk sumbernya. Obat nyamuk bakar, butana, dan knalpot menghasilkan pembacaan yang rapat karena alirannya tetap, sedangkan asap rokok dan uap alkohol jauh lebih lebar karena mengepul putus-putus dan menguap dengan laju yang berubah-ubah, sehingga jumlah yang mencapai sensor tidak selalu sama.

C. Hasil Lima Skenario Multisensor

Hasil pengujian lima skenario disajikan pada Tabel III. Dari empat belas kejadian yang tercatat, seluruh keputusan tepat sehingga ketepatan mencapai seratus persen, melampaui target 85 persen.

TABEL III
RINGKASAN HASIL PENGUJIAN LIMA SKENARIO MULTISENSOR

Skenario	Deskripsi Singkat	Percobaan	Berhasil	Gagal
A	Gas berbahaya dan orang tanpa masker	3	3	0
B	Gas berbahaya dan orang bermasker	4	4	0
C	Gas berbahaya tanpa kehadiran orang	3	3	0
D	Orang lewat tanpa kondisi gas	3	3	0
E	Gas berbahaya dan dua orang, status masker bervariasi	4	4	0

Skenario C memberikan temuan yang paling menarik. Pada ketiga percobaannya, sensor piroelektrik melaporkan gerakan padahal tidak ada orang di dalam bidang pandang kamera, sehingga kombinasi gas dan gerakan sama-sama positif. Sistem berbasis aturan akan membunyikan alarm pada ketiga kejadian tersebut. Prototipe ini menahannya karena lapisan verifikasi visual tidak menemukan orang di dalam bingkai. Temuan ini sekaligus memperlihatkan bahwa sensor gas dan sensor gerak tidak sepenuhnya saling bebas, suatu asumsi yang sering diambil begitu saja pada perancangan multisensor.

Contoh notifikasi yang diterima pengguna ditampilkan pada Gambar. 4. Tiap pesan memuat waktu kejadian, nilai pembacaan sensor gas, hasil verifikasi visual, dan citra yang diambil kamera pada saat itu. Citra yang ditampilkan merupakan citra penulis sendiri, sedangkan wajah partisipan lain disamarkan sesuai pengendalian privasi yang diterapkan pada penelitian ini.



Gambar. 4 Notifikasi Telegram beserta citra terlampir pada tiga kejadian berturut-turut

D. Latensi Ujung ke Ujung

Rincian latensi pada empat belas kejadian disajikan pada Tabel IV.

TABEL IV
LATENSI RATA-RATA TIAP TAHAP PADA EMPAT BELAS KEJADIAN (MILIDETIK)

Tahap	Rata-rata	Terendah	Tertinggi
Akuisisi citra	2844	618	9569
Verifikasi vision	4472	1100	9389
Pengiriman notifikasi	4286	19	17352
Total	11602	2883	26401

Rata-rata latensi total 11,6 detik memenuhi target 15 detik, meskipun empat dari empat belas kejadian melampauinya. Angka rata-rata pada Tabel IV menyedatkan

bila tidak dipisah menurut jenis kejadian. Pada kejadian yang tidak memicu alarm, tahap notifikasi hanya memakan 19 milidetik karena tidak ada yang dikirim, sedangkan pada kejadian yang memicu alarm rata-ratanya melonjak menjadi 9976 milidetik. Selisih itu adalah biaya mengunggah citra ke Telegram melalui jaringan nirkabel.

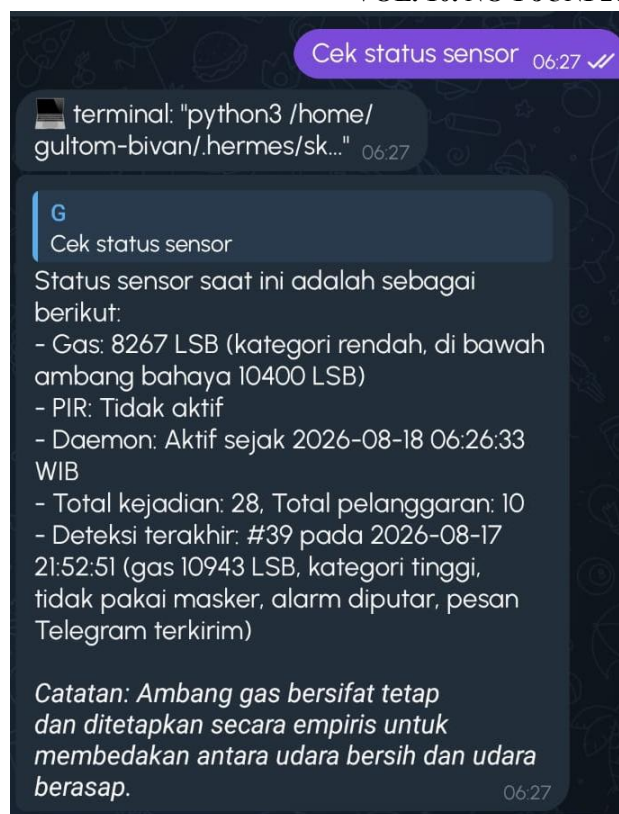
Pemisahan yang sama tampak pada latensi keseluruhan: kejadian tanpa alarm rata-rata selesai dalam 6911 milidetik, sedangkan kejadian yang memicu alarm rata-rata 17858 milidetik. Keempat kejadian yang melewati batas 15 detik seluruhnya merupakan kejadian yang memicu alarm. Dengan demikian latensi pengambilan keputusan sistem sesungguhnya berada di bawah tujuh detik, dan bagian yang melewati batas adalah pengiriman bukti visual yang bergantung pada kondisi jaringan.

Tahap akuisisi citra menyimpan temuan yang paling menentukan bagi penerapan nyata. Tahap ini berlangsung sejak tepi naik sensor PIR sampai bingkai tersimpan, dengan rata-rata 2844 milidetik dan nilai tertinggi 9569 milidetik. Selama jeda tersebut subjek harus masih berada di dalam bidang pandang kamera agar citra yang diperiksa memuat wajahnya; verifikasi *vision* sesudahnya berlangsung atas citra yang sudah tersimpan sehingga tidak lagi menuntut kehadiran subjek. Ruang uji pada penelitian ini hanya selebar tiga meter, sedangkan orang yang berjalan pada kecepatan lazim sekitar 1,4 meter per detik akan melintasinya dalam waktu sekitar dua detik, yaitu lebih singkat daripada rata-rata waktu akuisisi. Karena itu seluruh skenario dijalankan dengan subjek berjalan pelan dan berhenti sejenak di dalam bidang pandang, dan ketepatan yang dilaporkan pada Tabel III berlaku untuk kondisi tersebut.

Keterbatasan itu bersumber pada geometri ruang, bukan pada perangkat lunak. Penempatan yang lebih sesuai bagi rancangan ini adalah lorong atau koridor memanjang, karena sensor PIR dapat dipasang jauh di awal jalur lintasan sehingga sistem memperoleh jeda beberapa detik antara terpicunya sensor dan saat subjek memasuki bidang pandang kamera. Pada ruang persegi berukuran kecil, sensor gerak dan kamera mau tidak mau menghadap bidang yang hampir sama sehingga jeda tersebut nyaris tidak ada.

E. Antarmuka Tanya Jawab Hermes Agent

Jalur peringatan waktu nyata ditangani *daemon*, sedangkan pertanyaan pengguna ditangani Hermes Agent melalui bot Telegram yang sama. Gambar. 5 memperlihatkan tanggapan agen atas pertanyaan berbahasa alami "Cek status sensor". Agen memanggil *skill current-status*, membaca basis data SQLite beserta status unit systemd, lalu menyusun sendiri jawabannya: pembacaan gas terakhir beserta kategorinya, status sensor PIR, lama *daemon* berjalan, rekapitulasi kejadian, dan rincian deteksi terakhir.



Gambar. 5 Tanggapan Hermes Agent atas pertanyaan berbahasa alami mengenai status sensor

Pemisahan kedua jalur ini disengaja. Pertanyaan pengguna tidak menyentuh alur deteksi, sehingga jawaban agen yang gagal atau lambat tidak menunda alarm. Sebaliknya, pengguna dapat memeriksa keadaan ruangan tanpa membuka terminal maupun basis data.

Rekapitulasi pada gambar tersebut, yaitu 28 kejadian dengan 10 pelanggaran, dihitung atas seluruh isi basis data sejak sistem pertama kali dijalankan, termasuk sesi pengembangan. Angka itu berbeda dari empat belas kejadian pada Tabel III yang hanya mencakup lima skenario pengujian terkendali.

F. Perbandingan dengan Studi Terdahulu

Dibandingkan pendekatan berbasis aturan dengan sensor tunggal, sistem ini menambahkan satu lapisan keputusan yang perbedaannya terukur pada Skenario C sebagaimana diuraikan di atas. Dibandingkan sistem multisensor berbasis pembelajaran mesin yang dilatih khusus, pendekatan ini menukar akurasi yang terjamin dengan kemudahan penerapan: tidak diperlukan pengumpulan data latih, pelabelan, maupun pelatihan model, sehingga aturan keputusan dapat diubah hanya dengan menyunting rumusan perintah. Sebaliknya, sistem menjadi bergantung pada ketersediaan koneksi internet dan pada perilaku model yang tidak dikendalikan peneliti.

Dari sisi biaya operasional, pemanggilan model hanya dilakukan ketika kondisi memicu ganda terpenuhi. Selama empat belas kejadian pengujian, jumlah pemanggilan tetap sama dengan jumlah kejadian, sehingga biaya tumbuh sebanding dengan peristiwa nyata dan bukan dengan lama waktu sistem menyala.

IV. KESIMPULAN

Prototipe sistem peringatan dini keselamatan ruang kerja berbasis multisensor dan AI Agent berhasil dirancang dan dibangun pada platform Raspberry Pi 4 Model B. Ambang deteksi gas dapat ditetapkan secara empiris pada 10400 LSB, yaitu titik tengah selang kosong selebar 2875 LSB yang memisahkan sebaran udara bersih dari sebaran udara berasap tanpa satu pun sampel di antaranya. Ambang tersebut terbukti berlaku pula untuk tujuh jenis sumber gas yang diuji.

Dari empat belas kejadian pada lima skenario pengujian, seluruh keputusan tepat tanpa positif palsu maupun negatif palsu sehingga melampaui target ketepatan 85 persen. Rata-rata latensi ujung ke ujung 11,6 detik memenuhi target 15 detik, meskipun empat kejadian melampauinya akibat keragaman kondisi jaringan.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada lapisan verifikasi visual yang terbukti menahan alarm pada tiga kejadian Skenario C, yaitu ketika sensor piroelektrik melaporkan gerakan tanpa kehadiran orang. Sistem berbasis aturan akan membunyikan alarm palsu pada kondisi tersebut.

Keterbatasan penelitian ini mencakup pembacaan gas yang dilaporkan dalam satuan LSB dan volt, bukan ppm, karena konversi ke ppm menuntut kalibrasi R0 pada kondisi acuan serta pengetahuan jenis gas yang diukur sedangkan MQ-2 tidak selektif. Waktu akuisisi citra yang rata-rata 2844 milidetik juga menuntut subjek berhenti sejenak di dalam bidang pandang, sehingga ketepatan yang dilaporkan belum mewakili subjek yang bergerak pada kecepatan berjalan biasa. Sistem juga bergantung pada koneksi internet untuk verifikasi visual. Pengembangan lanjutan dapat diarahkan pada penempatan sensor gerak yang lebih jauh di awal jalur lintasan, penggunaan model *vision* luring agar sistem tetap berfungsi penuh tanpa jaringan, serta pengujian jangka panjang pada ruangan sebenarnya.

REFERENSI

- [1] Badan Nasional Penanggulangan Bencana, *Data Informasi Bencana Indonesia*, 2024. [Daring]. Tersedia: <https://dibi.bnpb.go.id>
- [2] United Nations International Strategy for Disaster Reduction, *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Swiss: UNISDR, 2009.
- [3] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, dan M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, hlm. 1645–1660, 2013.
- [4] B. Khaleghi, A. Khamis, F. O. Karray, dan S. N. Razavi, "Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art," *Inf. Fusion*, vol. 14, no. 1, hlm. 28–44, 2013.
- [5] F. Saeed, A. Paul, A. Rehman, W. H. Hong, dan H. Seo, "IoT-based intelligent modeling of smart home environment for fire prevention and safety," *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 7, no. 1, art. 11, 2018.
- [6] M. I. Kurniawan, U. Sunarya, dan R. Tulloh, "Internet of Things: Sistem keamanan rumah berbasis Raspberry Pi dan Telegram Messenger," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 6, no. 1, hlm. 1–15, 2018.
- [7] S. Kamel, A. Jamal, K. Omri, dan M. Khayyat, "An IoT-based fire safety management system for educational buildings: A case study," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 13, no. 7, hlm. 765–771, 2022.

[8] S. Majid, F. Alenezi, S. Masood, M. Ahmad, E. S. Gunduz, dan K. Polat, "Attention based CNN model for fire detection and localization in real-world images," *Expert Syst. Appl.*, vol. 189, art. 116114, 2022.

[9] *Raspberry Pi 4 Model B Datasheet*, Rilis 1.1, Dok. RP-008341-DS, Raspberry Pi Ltd., Cambridge, Inggris, 2024.

[10] *MQ-2 Gas Sensor: Technical Data*, Hanwei Electronics Co., Ltd., Zhengzhou, Tiongkok, 2015.

[11] *ADS1113, ADS1114, ADS1115: Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference*, Datasheet SBAS444B, Texas Instruments Inc., Dallas, TX, 2009.

[12] NousResearch, *Hermes Agent Documentation*, 2024. [Daring]. Tersedia: <https://github.com/NousResearch/hermes-agent>