

ANALISIS KINERJA DAN IMPLEMENTASI SISTEM PENDETEKSI KEBOCORAN GAS BERBASIS IoT DALAM Mendukung IMPLEMENTASI SMART INDUSTRY DI PT. DEKADE PRIORITAS (MULTI GROUP)

Wijar Algifari, Abdul Halim, Ali Rohman

Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Bina Bangsa

Email : wijaralgifari@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan gas LPG di lingkungan industri memiliki risiko kebocoran yang dapat menyebabkan kebakaran maupun ledakan apabila tidak terdeteksi secara dini. Oleh karena itu, diperlukan sistem yang mampu melakukan deteksi dan monitoring secara real-time untuk meningkatkan keselamatan kerja. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pendeteksi kebocoran gas berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor MQ-6 dan NodeMCU ESP8266 dalam mendukung implementasi Smart Industry di PT. Dekade Prioritas (Multi Group). Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D) yang meliputi analisis kebutuhan, perancangan prototipe, implementasi, dan pengujian sistem. Sistem dikembangkan dengan mengintegrasikan sensor MQ-6, NodeMCU ESP8266, LCD I2C, LED, buzzer, dan Telegram Bot sebagai media monitoring serta notifikasi secara real-time. Pengujian dilakukan terhadap sensitivitas sensor, response time, keberhasilan pengiriman notifikasi Telegram, dan stabilitas sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kebocoran gas secara otomatis, memberikan peringatan melalui indikator lokal, serta mengirimkan notifikasi kepada pengguna secara real-time dengan komunikasi yang stabil. Implementasi teknologi IoT pada sistem ini mampu meningkatkan efektivitas monitoring kebocoran gas dan berpotensi mendukung peningkatan keselamatan kerja dalam penerapan konsep Smart Industry.

Kata Kunci : *Internet of Things, Sensor MQ-6, NodeMCU ESP8266, Deteksi Kebocoran Gas, Smart Industry.*

1. PENDAHULUAN

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan salah satu aspek penting dalam mendukung keberlangsungan operasional industri, terutama pada lingkungan kerja yang memiliki risiko tinggi terhadap kebakaran dan ledakan. Salah satu potensi bahaya yang sering ditemui adalah kebocoran gas LPG yang digunakan sebagai sumber energi dalam berbagai aktivitas industri. Apabila kebocoran gas tidak terdeteksi secara dini, kondisi tersebut dapat memicu kecelakaan kerja, kerusakan fasilitas produksi, bahkan mengancam keselamatan pekerja. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang mampu mendeteksi kebocoran gas secara cepat, akurat, dan berkelanjutan untuk meminimalkan risiko yang ditimbulkan [1].

Pada praktiknya, proses identifikasi kebocoran gas di berbagai industri masih banyak dilakukan secara manual dengan mengandalkan penciuman atau inspeksi visual oleh operator. Pendekatan tersebut memiliki berbagai keterbatasan karena sangat bergantung pada kemampuan manusia dalam mengenali keberadaan gas, sehingga berpotensi menimbulkan keterlambatan penanganan ketika terjadi kebocoran. Selain itu, metode manual tidak mampu menyediakan informasi kondisi lingkungan secara real-time maupun memberikan peringatan dini kepada petugas yang berada di luar lokasi kejadian [2]. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pemanfaatan teknologi yang mampu meningkatkan efektivitas sistem pengawasan keselamatan kerja.

Perkembangan Internet of Things (IoT) telah memberikan peluang baru dalam pengembangan

sistem monitoring berbasis sensor yang mampu melakukan pengumpulan, pengolahan, dan pengiriman data secara otomatis melalui jaringan internet. Integrasi sensor dengan mikrokontroler dan media komunikasi digital memungkinkan kondisi lingkungan dipantau secara real-time sehingga pengguna dapat memperoleh informasi secara cepat dan mengambil tindakan pencegahan sebelum terjadi kecelakaan. Dalam konteks industri, implementasi IoT menjadi salah satu teknologi pendukung konsep Smart Industry, yaitu pemanfaatan sistem cerdas untuk meningkatkan produktivitas, efisiensi operasional, dan keselamatan kerja [3].

Salah satu perangkat yang banyak digunakan dalam sistem deteksi kebocoran gas adalah sensor MQ-6 yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap gas LPG. Sensor tersebut dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 yang telah dilengkapi konektivitas WiFi sehingga data hasil pembacaan sensor dapat dikirimkan secara langsung ke platform monitoring. Selain menampilkan kondisi gas pada perangkat lokal melalui LED, buzzer, dan LCD, sistem juga dapat memberikan notifikasi kepada pengguna melalui aplikasi pesan instan sehingga proses pengawasan dapat dilakukan dari berbagai lokasi [4].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem deteksi gas berbasis IoT mampu meningkatkan efektivitas pemantauan dibandingkan metode konvensional. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada implementasi di lingkungan rumah tangga atau laboratorium, sementara penerapannya pada lingkungan industri

yang memiliki tingkat risiko lebih tinggi masih relatif terbatas. Selain itu, beberapa sistem hanya menyediakan fungsi monitoring tanpa mengintegrasikan klasifikasi tingkat bahaya, indikator multi-output, serta mekanisme notifikasi yang responsif bagi pengguna [5].

PT. Dekade Prioritas (Multi Group) merupakan perusahaan yang memiliki aktivitas pemotongan besi dan penggunaan gas pada proses produksi sehingga memiliki potensi risiko kebocoran gas yang perlu diawasi secara berkelanjutan. Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu sistem yang mampu melakukan deteksi kebocoran gas secara otomatis, memberikan informasi kondisi lingkungan secara real-time, serta mengirimkan peringatan dini kepada pengguna ketika konsentrasi gas melebihi ambang batas aman. Penerapan sistem tersebut diharapkan dapat meningkatkan efektivitas pengawasan keselamatan kerja sekaligus mendukung implementasi Smart Industry melalui pemanfaatan teknologi Internet of Things.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja dan mengimplementasikan sistem pendeteksi kebocoran gas berbasis Internet of Things menggunakan sensor MQ-6 dan NodeMCU ESP8266 yang terintegrasi dengan sistem monitoring real-time. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu meningkatkan kecepatan deteksi, efektivitas penyampaian informasi, serta mendukung upaya pencegahan kecelakaan kerja pada lingkungan industri sehingga memberikan kontribusi terhadap peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja di PT. Dekade Prioritas (Multi Group).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan berbagai perangkat fisik melalui jaringan internet sehingga mampu mengumpulkan, mengirimkan, dan bertukar data secara otomatis tanpa intervensi manusia. Teknologi IoT mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, aktuator, dan media komunikasi untuk menghasilkan sistem yang mampu melakukan pemantauan (monitoring) serta pengendalian (control) secara real-time [6]. Dalam lingkungan industri, IoT menjadi salah satu teknologi utama pada implementasi Smart Industry karena mampu meningkatkan efisiensi operasional, produktivitas, dan keselamatan kerja melalui proses pengumpulan data secara berkelanjutan [7].

2.2. Sistem Deteksi Kebocoran Gas

Sistem deteksi kebocoran gas merupakan sistem yang dirancang untuk mengidentifikasi keberadaan gas yang berpotensi membahayakan lingkungan kerja. Sistem ini umumnya memanfaatkan sensor gas sebagai perangkat input yang mampu mendeteksi perubahan konsentrasi gas di udara, kemudian mengirimkan informasi tersebut kepada pengguna melalui indikator visual, audio, maupun media

komunikasi digital. Penerapan sistem deteksi gas secara otomatis mampu mempercepat proses identifikasi potensi bahaya sehingga risiko kecelakaan akibat kebocoran gas dapat diminimalkan [8].

2.3. NodeMCU ESP8266

NodeMCU ESP8266 merupakan mikrokontroler berbasis mod7.6ul WiFi yang banyak digunakan pada pengembangan perangkat Internet of Things karena memiliki kemampuan komunikasi data melalui jaringan internet dengan konsumsi daya yang relatif rendah. Selain mendukung pemrograman menggunakan Arduino IDE, NodeMCU juga mampu berkomunikasi dengan berbagai jenis sensor dan platform monitoring sehingga sesuai digunakan sebagai pusat kendali pada sistem deteksi kebocoran gas berbasis IoT [9].

2.4. Sensor MQ-6

Sensor MQ-6 merupakan sensor semikonduktor yang dirancang untuk mendeteksi gas LPG, propana, dan butana dengan tingkat sensitivitas yang tinggi. Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan resistansi material sensitif terhadap konsentrasi gas yang terdeteksi di udara. Dalam sistem monitoring berbasis IoT, sensor MQ-6 digunakan sebagai perangkat utama untuk memperoleh data konsentrasi gas yang kemudian diproses oleh mikrokontroler sebelum diteruskan ke media monitoring maupun sistem peringatan dini [10].

2.5. Smart Industry

Smart Industry merupakan konsep pengembangan industri modern yang mengintegrasikan teknologi digital, Internet of Things, kecerdasan buatan, serta sistem komunikasi data dalam mendukung proses produksi yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan. Salah satu implementasi Smart Industry adalah penggunaan sistem monitoring otomatis untuk mendeteksi potensi bahaya di lingkungan kerja sehingga proses pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih cepat berdasarkan data real-time [11].

2.6. Penelitian Relevan

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa implementasi Internet of Things pada sistem deteksi kebocoran gas memberikan hasil yang efektif dalam meningkatkan keselamatan kerja maupun keamanan lingkungan.

Penelitian [12] mengembangkan sistem pendeteksi kebocoran LPG menggunakan sensor MQ-6 dan ESP8266 berbasis IoT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan notifikasi secara real-time kepada pengguna dengan tingkat respons yang cepat, namun belum menerapkan klasifikasi tingkat bahaya berdasarkan konsentrasi gas. Penelitian [13] merancang sistem monitoring gas industri berbasis Internet of Things menggunakan beberapa sensor lingkungan. Hasil penelitian

membuktikan bahwa integrasi sensor dengan platform monitoring meningkatkan efektivitas pengawasan kondisi lingkungan kerja, tetapi belum menyediakan indikator lokal berupa LCD maupun alarm multi-level.

Penelitian [14] mengimplementasikan NodeMCU ESP8266 sebagai pusat komunikasi pada sistem monitoring industri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa NodeMCU memiliki stabilitas komunikasi data yang tinggi dengan konsumsi daya rendah sehingga sesuai digunakan pada sistem monitoring real-time.

Penelitian [15] mengembangkan sistem peringatan dini menggunakan kombinasi indikator LED dan buzzer pada lingkungan industri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan indikator visual dan audio secara bersamaan mampu meningkatkan kecepatan respons operator dibandingkan penggunaan satu jenis indikator saja.

Penelitian [16] menerapkan teknologi Internet of Things dalam sistem keselamatan industri berbasis Smart Industry. Hasil penelitian menunjukkan bahwa monitoring real-time mampu meningkatkan efektivitas pengawasan lingkungan kerja serta mempercepat pengambilan keputusan ketika terjadi kondisi darurat. Namun, penelitian tersebut lebih berfokus pada sistem monitoring secara umum dan belum secara khusus membahas implementasi deteksi kebocoran gas LPG menggunakan sensor MQ-6.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, masih terdapat peluang untuk mengembangkan sistem deteksi kebocoran gas yang mengintegrasikan sensor MQ-6, NodeMCU ESP8266, indikator multi-output, serta monitoring dan notifikasi real-time dalam satu sistem yang mendukung implementasi Smart Industry.

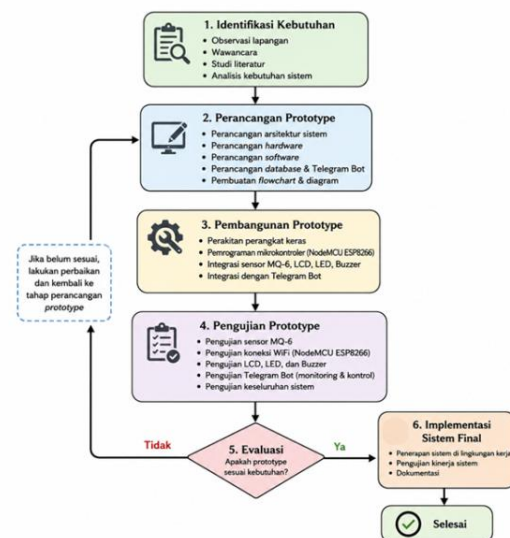
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) karena bertujuan menghasilkan sekaligus mengimplementasikan produk berupa sistem pendeteksi kebocoran gas berbasis Internet of Things (IoT). Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan proses pengembangan dilakukan secara sistematis mulai dari identifikasi kebutuhan, perancangan, pembangunan prototipe, pengujian, hingga implementasi sistem sehingga produk yang dihasilkan dapat dievaluasi secara fungsional sebelum digunakan pada lingkungan industri [17], [18].

Penelitian dilaksanakan di PT. Dekade Prioritas (Multi Group) dengan objek penelitian berupa sistem deteksi kebocoran gas pada area kerja yang memiliki potensi risiko penggunaan gas. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan untuk mengidentifikasi kondisi operasional dan potensi bahaya, wawancara dengan pihak perusahaan mengenai kebutuhan sistem keselamatan kerja, serta studi pustaka yang berasal dari buku, jurnal ilmiah, standar keselamatan, dan dokumentasi teknis yang berkaitan dengan Internet of Things, sensor gas, serta implementasi Smart Industry.

Tahapan pengembangan sistem diawali dengan analisis kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak. Selanjutnya dilakukan perancangan prototipe menggunakan sensor MQ-6 sebagai pendeteksi gas LPG, NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler, LCD sebagai media tampilan lokal, LED dan buzzer sebagai indikator peringatan, serta Telegram Bot sebagai media monitoring dan notifikasi real-time. Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C/C++, sedangkan komunikasi data dilakukan melalui jaringan WiFi sehingga informasi hasil pembacaan sensor dapat dikirimkan secara langsung kepada pengguna.

Evaluasi sistem dilakukan melalui beberapa pengujian, yaitu pengujian akurasi sensor MQ-6, pengujian waktu respons (response time), pengujian keberhasilan pengiriman notifikasi Telegram, pengujian monitoring real-time, serta pengujian stabilitas sistem. Pengujian sistem mengacu pada prinsip evaluasi fungsional perangkat lunak dan sistem [19]. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendeteksi perubahan konsentrasi gas, kecepatan penyampaian informasi, serta keandalan komunikasi data selama proses monitoring berlangsung. Hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan data hasil implementasi terhadap kriteria keberhasilan yang telah ditetapkan sehingga dapat diketahui tingkat efektivitas sistem dalam mendukung keselamatan kerja di lingkungan industri.



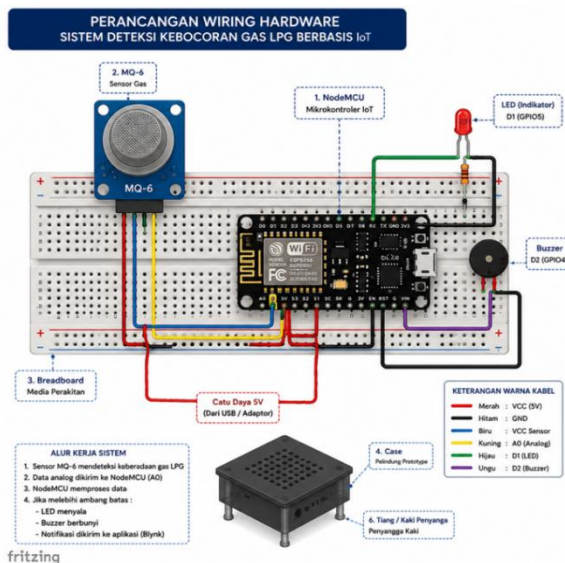
Gambar 1. Alur Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Implementasi Sistem

Sistem pendeteksi kebocoran gas berbasis Internet of Things (IoT) berhasil dikembangkan menggunakan sensor MQ-6 sebagai perangkat input, NodeMCU ESP8266 sebagai pusat pemrosesan data, serta beberapa perangkat output berupa LCD I2C, LED, buzzer, dan aplikasi Telegram sebagai media monitoring. Implementasi sistem dilakukan dengan

mengintegrasikan seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak sehingga mampu melakukan proses deteksi gas secara otomatis dan memberikan informasi kondisi lingkungan secara real-time.

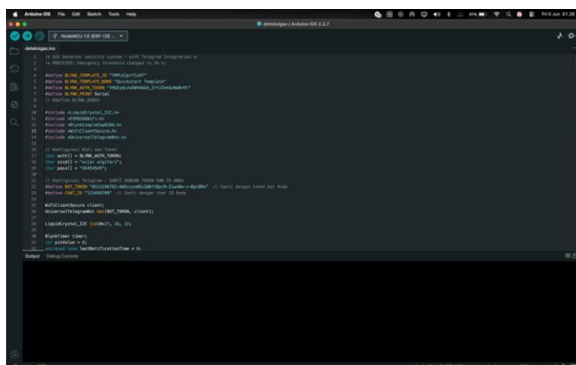


Gambar 2. Implementasi Perangkat Keras

Berdasarkan implementasi perangkat keras, sensor MQ-6 ditempatkan sebagai komponen utama untuk membaca konsentrasi gas LPG di lingkungan sekitar. Data yang diperoleh sensor diproses oleh NodeMCU ESP8266, kemudian sistem menentukan kondisi aman, waspada, atau bahaya berdasarkan nilai ambang batas yang telah ditentukan. Selanjutnya NodeMCU mengaktifkan perangkat output berupa LED sebagai indikator visual, buzzer sebagai alarm peringatan, LCD untuk menampilkan informasi lokal, serta mengirimkan notifikasi melalui aplikasi Telegram apabila terjadi kebocoran gas.

4.2. Implementasi Program

Program sistem dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman C/C++ pada Arduino IDE. Program mengatur proses pembacaan data sensor MQ-6 secara terus-menerus (looping), pengolahan nilai sensor, pengambilan keputusan berdasarkan ambang batas, serta pengiriman data melalui jaringan WiFi menuju aplikasi Telegram.

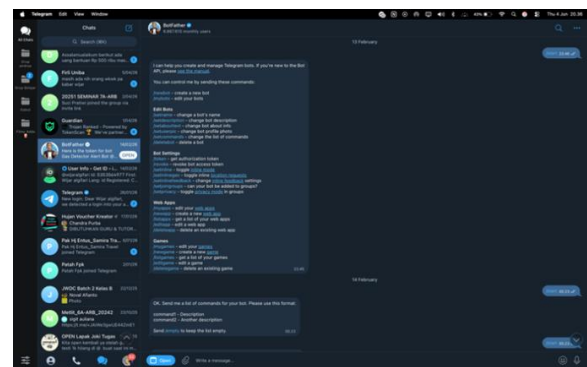


Gambar 3. Listing Program NodeMCU ESP8266

Program juga mengatur sinkronisasi antar komponen sehingga setiap perubahan konsentrasi gas langsung diproses tanpa memerlukan intervensi pengguna. Dengan demikian sistem mampu bekerja secara otomatis dalam melakukan monitoring kondisi lingkungan.

4.3. Implementasi Monitoring Telegram

Monitoring dilakukan menggunakan aplikasi Telegram melalui Telegram Bot yang telah dikonfigurasi sebelumnya. Sistem akan mengirimkan pesan otomatis apabila sensor mendeteksi konsentrasi gas melebihi batas aman. Selain itu pengguna juga dapat memonitor kondisi sistem secara real-time melalui smartphone selama NodeMCU terhubung ke jaringan internet.



Gambar 4. Monitoring Menggunakan Telegram Bot

Implementasi monitoring berbasis Telegram memberikan kemudahan bagi pengguna karena informasi mengenai kondisi lingkungan dapat diterima secara cepat meskipun pengguna tidak berada di lokasi alat dipasang.

4.4. Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem dalam mendeteksi kebocoran gas LPG, mengirimkan notifikasi, serta menjaga stabilitas komunikasi data selama proses monitoring berlangsung. Pengujian meliputi sensitivitas sensor MQ-6, waktu respons sistem, keberhasilan pengiriman notifikasi Telegram, serta stabilitas sistem.

4.5. Pengujian Sensitivitas Sensor

Pengujian sensitivitas dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor MQ-6 dalam mendeteksi perubahan konsentrasi gas LPG pada berbagai kondisi pengujian.

Tabel 1. Hasil Pengujian Sensitivitas Sensor MQ-6

Sistem	Nilai Gas	Ambang Bahaya	Kondisi	Waktu
Aktif	5%	>5%	Bahaya	185 Second
Aktif	10%	>5%	Bahaya	145 Second
Aktif	4%	<5%	Normal	120 Second
Aktif	2%	<5%	Normal	95 Second

Berdasarkan hasil pengujian, sensor MQ-6 mampu mendeteksi keberadaan gas LPG dengan baik pada seluruh skenario pengujian. Perubahan konsentrasi gas dapat dibaca secara konsisten sehingga data yang diterima NodeMCU dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan status keamanan lingkungan.

4.6. Pembahasan

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan teknologi Internet of Things dengan perangkat pendeteksi kebocoran gas sehingga mampu melakukan monitoring kondisi lingkungan secara real-time. Integrasi sensor MQ-6 dengan NodeMCU ESP8266 memungkinkan proses deteksi dilakukan secara otomatis, sedangkan komunikasi melalui jaringan WiFi memungkinkan informasi kondisi lingkungan dikirimkan secara langsung kepada pengguna melalui Telegram.

Berdasarkan hasil pengujian sensitivitas, sensor MQ-6 mampu mendeteksi perubahan konsentrasi gas secara konsisten sehingga dapat digunakan sebagai perangkat utama dalam sistem pendeteksi kebocoran gas. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat keandalan yang baik dalam mengenali keberadaan gas LPG sehingga mampu memberikan informasi yang akurat kepada sistem.

Pengujian response time menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons dengan cepat setelah sensor mendeteksi kebocoran gas. Waktu respons yang relatif singkat sangat penting dalam sistem keselamatan industri karena memungkinkan pengguna segera melakukan tindakan pencegahan sebelum kondisi berkembang menjadi kebakaran maupun ledakan. Selain itu, keberhasilan pengiriman notifikasi Telegram membuktikan bahwa komunikasi data melalui jaringan internet berjalan dengan baik sehingga informasi kondisi bahaya dapat diterima secara real-time.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian [12] yang menunjukkan bahwa integrasi sensor MQ-6 dengan NodeMCU ESP8266 mampu meningkatkan efektivitas sistem deteksi kebocoran gas berbasis Internet of Things. Demikian pula, penelitian [13] menunjukkan bahwa monitoring berbasis IoT memberikan kemudahan dalam melakukan pengawasan kondisi lingkungan secara jarak jauh. Namun demikian, sistem yang dikembangkan pada penelitian ini memiliki keunggulan berupa integrasi indikator lokal (LED, buzzer, dan LCD) dengan sistem notifikasi Telegram sehingga pengguna memperoleh informasi baik secara langsung maupun melalui perangkat bergerak.

Secara keseluruhan, implementasi sistem berhasil memenuhi tujuan penelitian, yaitu menghasilkan sistem pendeteksi kebocoran gas yang mampu bekerja secara otomatis, memberikan informasi secara real-time, serta mendukung peningkatan keselamatan kerja di lingkungan industri.

Integrasi teknologi Internet of Things pada sistem ini menunjukkan potensi yang besar dalam mendukung penerapan Smart Industry, khususnya pada aspek monitoring keselamatan dan mitigasi risiko kebocoran gas.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan sistem pendeteksi kebocoran gas LPG berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor MQ-6 dan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 sebagai upaya mendukung implementasi Smart Industry di PT. Dekade Prioritas (Multi Group). Sistem yang dirancang mampu mendeteksi keberadaan gas secara otomatis, memproses data secara real-time, serta memberikan informasi kepada pengguna melalui indikator LED, buzzer, LCD, dan notifikasi Telegram. Integrasi perangkat keras dan perangkat lunak menghasilkan sistem yang mampu bekerja secara otomatis dalam melakukan pemantauan kondisi lingkungan sehingga dapat meningkatkan efektivitas pengawasan terhadap potensi kebocoran gas.

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, sistem menunjukkan kemampuan yang baik dalam mendeteksi kebocoran gas serta menyampaikan informasi kepada pengguna dalam waktu yang relatif cepat. Komunikasi data melalui jaringan internet berjalan secara stabil sehingga notifikasi dapat diterima secara real-time. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan teknologi Internet of Things pada sistem deteksi kebocoran gas mampu meningkatkan kecepatan respons terhadap kondisi darurat sekaligus mendukung terciptanya lingkungan kerja yang lebih aman. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan layak diterapkan sebagai salah satu solusi untuk meningkatkan keselamatan kerja melalui pemanfaatan teknologi digital di lingkungan industri.

Meskipun sistem yang dikembangkan telah mampu menjalankan fungsi deteksi dan monitoring dengan baik, masih terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan pada penelitian selanjutnya. Pengembangan dapat dilakukan dengan menambahkan sensor lain untuk mendeteksi berbagai jenis gas berbahaya sehingga cakupan pemantauan menjadi lebih luas. Selain itu, sistem dapat diintegrasikan dengan dashboard berbasis web atau aplikasi mobile untuk menyajikan data monitoring dalam bentuk grafik dan riwayat pengukuran secara lebih informatif.

Penelitian selanjutnya juga dapat mengembangkan fitur pengendalian otomatis, seperti pemutusan aliran gas atau pengaktifan sistem ventilasi ketika konsentrasi gas melebihi ambang batas tertentu, sehingga sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pendeteksi tetapi juga sebagai sistem mitigasi risiko. Pengujian dalam lingkungan industri dengan skala yang lebih besar dan waktu operasional yang lebih panjang juga diperlukan untuk mengevaluasi keandalan sistem secara menyeluruh sehingga

implementasinya dapat memberikan manfaat yang lebih optimal dalam mendukung penerapan konsep Smart Industry.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Labour Organization, *Safety and Health at the Heart of the Future of Work*. Geneva, Switzerland: ILO, 2023.
- [2] National Fire Protection Association, *NFPA 54: National Fuel Gas Code*. Quincy, MA, USA: NFPA, 2024.
- [3] L. Da Xu, W. He, and S. Li, "Internet of Things in Industries: A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 20, no. 3, pp. 2156–2171, 2024.
- [4] A. Kumar, R. Singh, and P. Sharma, "IoT-Based Smart Gas Leakage Detection and Monitoring System Using ESP8266," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 45211–45225, 2024.
- [5] M. Alqahtani, H. Aljuaid, and A. Alghamdi, "Real-Time Industrial Gas Monitoring System Based on Internet of Things," *Sensors*, vol. 24, no. 8, pp. 1–19, 2024.
- [6] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 1–39, 2022.
- [7] S. Yin and O. Kaynak, "Industrial Big Data and Smart Industry: State-of-the-Art and Future Trends," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 19, no. 5, pp. 6021–6032, 2023.
- [8] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, and T. Watson, "The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework," *Computers in Industry*, vol. 101, pp. 1–12, 2022.
- [9] Espressif Systems, *ESP8266EX Datasheet, Version 7.0*. Shanghai, China: Espressif Systems, 2024.
- [10] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., *MQ-6 Semiconductor Gas Sensor Technical Manual*. Zhengzhou, China: Winsen Electronics, 2023.
- [11] F. Tao, Q. Qi, A. Liu, and A. Kusiak, "Data-Driven Smart Manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 68, pp. 102–118, 2023.
- [12] P. Sharma, A. Kumar, and R. Singh, "IoT-Based LPG Gas Leakage Detection Using MQ-6 Sensor and ESP8266," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 44120–44133, 2024.
- [13] M. Alghamdi, H. Aljuaid, and A. Alotaibi, "Real-Time Industrial Gas Monitoring System Using Internet of Things," *Sensors*, vol. 24, no. 6, pp. 1–18, 2024.
- [14] S. Ramesh, P. Kumar, and V. Raj, "Performance Evaluation of ESP8266-Based IoT Monitoring Systems," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 14, no. 9, pp. 615–623, 2023.
- [15] Y. Chen, L. Wang, and X. Zhao, "Design of Multi-Alert Early Warning System for Industrial Safety," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 35, Art. no. 100512, 2023.
- [16] M. Ahmed, S. Khan, and A. Rehman, "Implementation of Smart Industrial Safety Monitoring Based on Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 18234–18249, 2025.
- [17] J. W. Creswell and J. D. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 6th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2023.
- [18] W. R. Borg and M. D. Gall, *Educational Research: An Introduction*, 10th ed. New York, NY, USA: Routledge, 2022.
- [19] P. Ammann and J. Offutt, *Introduction to Software Testing*, 3rd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2024.