



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 1 (2026) pp: 14642-14649

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Rancang Bangun Sistem Alarm dan Shutdown Otomatis Pada Pipa Discharge Gas Kapal Fpso (*Floating Production Storage and Offloading*)

Agus Dwi Santoso¹, Dewa Gede Aditya Bhaskara², Moejiono³, Frita Ayu Sistyana Putri⁴, Andrew Joewono⁵
^{1,2,3,4} Politeknik Pelayaran Surabaya

^{1,3,5}Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

agusbp2ipsby@gmail.com, adityabaskara138@gmail.com, moejiono@poltekpel-sby.ac.id, frita.ayu.sp@gmail.com
andrew_sbv@ukwms.ac.id

Abstrak

Sistem perpipaan gas bertekanan tinggi pada fasilitas *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) merupakan komponen kritis yang memiliki risiko tinggi terhadap kebocoran dan ledakan yang dapat mengancam keselamatan awak kapal serta instalasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem proteksi otomatis sebagai langkah preventif terhadap bahaya kebakaran dan kebocoran gas pada pipa discharge gas FPSO. Metode penelitian yang diterapkan adalah *Research and Development* (R&D) dengan mengintegrasikan sensor gas MQ-2 dan sensor api (flame sensor) berbasis mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali. Sistem ini dirancang untuk melakukan pemantauan kondisi abnormal secara real-time dan memberikan respons mandiri melalui mekanisme fail-safe. Ketika kadar gas atau keberadaan api terdeteksi melebihi ambang batas aman, sistem secara otomatis memicu alarm buzzer, menyalakan indikator LED merah, dan mengaktifkan mekanisme shutdown dengan memutus aliran gas melalui solenoid valve. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja secara responsif dengan titik kritis shutdown otomatis pada kadar gas 415 PPM. Deteksi maksimal pada sensor gas tercapai pada jarak 5 cm dengan nilai 987 PPM (4,92 V), sementara sensor api menunjukkan kecepatan respons instan sebesar 0,52 detik pada jarak dekat. Meskipun analisis perhitungan menunjukkan nilai error sebesar 20% pada sensor gas akibat faktor hysteresis dan kondisi lingkungan terbuka, sistem secara keseluruhan memiliki tingkat keberhasilan fungsional sebesar 80%. Implementasi perangkat ini memiliki potensi besar sebagai solusi teknis untuk meningkatkan standar keselamatan kerja maritim dan mencegah kecelakaan kerja fatal pada instalasi pipa gas di lingkungan operasional kapal FPSO

Kata kunci: FPSO, Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan (K3L), MQ-2, Flame Sensor, Shutdown Otomatis, Solenoid Valve.

1. Latar Belakang

Sistem perpipaan gas bertekanan tinggi merupakan elemen krusial dalam operasional fasilitas *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), yang bertugas memproses dan menyalurkan gas dari sumur bawah laut. Jalur pipa discharge gas ini memiliki risiko tinggi karena tekanan yang besar dapat memicu kerusakan struktural hingga ledakan jika tidak diawasi secara ketat. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme proteksi berbasis tekanan gas yang mampu mendeteksi kondisi abnormal secara dini untuk menjamin keselamatan awak kapal dan keberlangsungan operasional di lingkungan lepas pantai yang berisiko tinggi (Paridi et al., 2024).

Sejalan dengan pandangan Wahyudianto et al. (2021) serta Hidayat & Ramadhan (2021), stabilitas dan keselamatan operasional industri sangat bergantung pada respons cepat terhadap lonjakan tekanan atau gangguan distribusi gas. Tanpa adanya sistem otomatisasi keamanan pipa gas (Sutrisno & Maulana, 2020), risiko kecelakaan kerja menjadi sangat besar. Hal ini mendasari kebutuhan mutlak akan integrasi alarm peringatan serta mekanisme pemutus arus/aliran otomatis (*shutdown*) sebagai lapis perlindungan utama dalam mencegah kebakaran akibat kebocoran gas (Fadillah & Syarifudin, 2022).

Urgensi sistem keamanan ini diperkuat oleh insiden nyata pada kapal MT Prima Lautan 1 di Karang Jamuang pada September 2023. Dalam kejadian tersebut, bau gas yang terdeteksi di area tangki tidak segera ditangani dengan prosedur pengamanan standar seperti penggunaan *Inert Gas Generator*. Akibat kelalaian penanganan dan adanya

pemicu berupa percikan listrik dari peralatan yang masih terhubung, terjadi ledakan hebat pada *mainhole* yang menyebabkan kebakaran besar serta cedera serius pada personel di lokasi operasional.

Pengalaman pahit tersebut membuktikan bahwa pemantauan manual saja tidak cukup untuk mencegah bencana akibat kebocoran gas bertekanan tinggi. Diperlukan inovasi teknologi berupa sistem monitoring suhu dan tekanan gas yang mampu bekerja secara *real-time* dan mandiri (Retnowati et al., 2023). Integrasi sensor yang akurat sangat penting untuk memberikan peringatan dini serta melakukan tindakan preventif tanpa bergantung sepenuhnya pada kecepatan reaksi manusia yang seringkali terbatas oleh situasi darurat di lapangan.

Lebih jauh lagi, pengembangan sistem keselamatan yang inovatif ini tidak hanya berorientasi pada aspek teknis, tetapi juga menjadi bagian integral dari prinsip keberlanjutan (Sustainability) guna mencapai target Sustainable Development Goals (SDGs). Pencegahan kebocoran dan ledakan di fasilitas lepas pantai berkontribusi langsung pada pemenuhan SDG 8 (Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi) dengan memastikan lingkungan kerja maritim yang aman dan meminimalkan risiko kecelakaan kerja. Selain itu, upaya ini sangat krusial dalam mendukung SDG 14 (Ekosistem Lautan) dengan mencegah potensi tumpahan hidrokarbon atau bahan kimia beracun yang dapat memicu pencemaran laut masif akibat insiden industri. Optimalisasi infrastruktur keselamatan pada kapal dan fasilitas FPSO ini juga merepresentasikan perwujudan SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) melalui penerapan teknologi yang tangguh dan memprioritaskan keseimbangan ekologi tanpa mengorbankan efisiensi operasional.

Sebagai solusi teknis, dikembangkanlah rancang bangun sistem alarm dan *shutdown* otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali (Musawa et al., 2023). Sistem ini memanfaatkan sensor gas (seperti tipe MQ-2) untuk mendeteksi potensi kebocoran gas (Adriansyah, 2024) dan dipadukan dengan sensor api untuk mendeteksi nyala api atau percikan (Budidarma, 2023). Saat bahaya terdeteksi, mikrokontroler akan merespons instan dengan mengaktifkan *buzzer* dan indikator LED, serta memicu *relay* otomatis (Lorenza, 2019) untuk memutus aliran gas melalui aktuator *solenoid valve* guna mencegah tekanan berlebih dan kebakaran (Purnama & Ariyanto, 2021; Wibowo, 2017). Sistem pengaman terintegrasi ini diharapkan menjadi langkah preventif yang esensial dalam meningkatkan standar keselamatan kerja maritim.

2. Metode Penelitian

2.1 Kajian Pustaka

Metode R&D merupakan pendekatan penelitian yang digunakan untuk menghasilkan produk tertentu dan menguji keefektifan produk tersebut dalam memecahkan masalah praktis di lapangan. Menurut Sugiyono (2023), terdapat sepuluh tahapan dalam siklus R&D, namun untuk pengembangan sistem otomasi skala laboratorium, penelitian dapat dibatasi pada lima tahap utama: desain produk, validasi desain, perbaikan desain, uji coba produk, dan revisi produk.

Fasilitas *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) memiliki risiko operasional tinggi terhadap bahaya tekanan berlebih (*overpressure*), kebocoran gas, dan ledakan. Implementasi sistem proteksi otomatis sangat krusial sebagai bagian dari sistem keselamatan fasilitas produksi lepas pantai guna meminimalkan risiko kecelakaan kerja. Analisis risiko pada sistem proteksi FPSO berbasis tekanan gas menjadi langkah preventif yang esensial dalam menjaga stabilitas operasional.

ESP32 merupakan unit pemroses pusat yang ideal untuk sistem monitoring *real-time* karena memiliki kemampuan pemrosesan tinggi dan konektivitas Wi-Fi terintegrasi. Penggunaan ESP32 memungkinkan sistem kendali tekanan gas bekerja secara otomatis dengan menerima input dari berbagai sensor dan mengeksekusi perintah ke aktuator secara instan.

Penggunaan sensor gas, seperti tipe MQ-2, terbukti efektif dalam mendeteksi konsentrasi gas mudah terbakar (LPG/Metana) di lingkungan industri. Sistem deteksi ini bekerja dengan membandingkan pembacaan kadar gas terhadap ambang batas (*set point*) yang telah ditentukan untuk memicu alarm peringatan dini.

Solenoid valve berfungsi sebagai elemen akhir (*final element*) yang memutus aliran fluida atau gas berdasarkan sinyal listrik dari mikrokontroler. Dalam aplikasi keselamatan industri, katup ini sering dikombinasikan dengan sistem proteksi *overpressure* untuk menghentikan distribusi gas secara cepat guna mencegah kerusakan instalasi lebih lanjut.

2.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development (R&D)*. Metode ini bertujuan untuk menghasilkan produk tertentu dan menguji keefektifannya dalam menyelesaikan masalah nyata (Sugiyono, 2023). Penelitian difokuskan pada pengembangan teknologi sistem proteksi tekanan dan kebakaran pada instalasi pipa *discharge* gas di kapal FPSO. Tahapan penelitian dibatasi pada lima tahap: Desain Produk, Validasi Desain, Perbaikan Desain, Uji Coba Produk, dan Revisi Produk.

2.3 Perancangan Sistem

Perancangan alat mencakup perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perangkat keras terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemroses data, Sensor MQ-2 untuk mendeteksi kadar gas, dan *Flame Sensor* untuk mendeteksi api. Output sistem berupa peringatan visual melalui Pilot LED (Hijau/Merah), peringatan suara melalui *Active Buzzer*, tampilan data melalui LCD 16x2 I2C (Fiqar et al., 2022), serta aktuator pemutus aliran gas berupa *Solenoid Valve* yang dikendalikan melalui Modul Relay 4 *Channel*. Pemrograman perangkat lunak menggunakan *Arduino IDE*.

2.4 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan di laboratorium dengan dua metode utama:

1. Uji Statis: Mengevaluasi kinerja masing-masing komponen secara individual (Sensor, ESP32, Relay, LCD, Buzzer, dan *Solenoid Valve*) guna memastikan setiap perangkat memberikan *output* tegangan atau respons yang sesuai standar sebelum diintegrasikan.
2. Uji Dinamis: Menguji sistem secara menyeluruh dengan memberikan simulasi gas dan api. Sistem diamati dalam merespons kondisi melampaui batas (*set point*) hingga aktuator *solenoid valve* melakukan penutupan (*shutdown*).

3. Hasil dan Analisis

Fase ekstraksi dan kuantifikasi data empiris dipecah menjadi dua disiplin pengujian, yakni Uji Statis terisolasi pada masing-masing blok instrumen dan Uji Dinamis Terpadu (*Integrated Dynamic Test*) untuk mengevaluasi fungsionalitas korelasional secara utuh dalam satu sistem terintegrasi.

3.1. Pemetaan Akurasi dan Sensitivitas Uji Statis Komponen

Tujuan utama dari pengujian statis adalah untuk memverifikasi fungsionalitas dan melokalisir integritas kurva kinerja setiap sirkuit elektrik agar bebas dari hambatan redaman latensi laten sebelum subsistem digabungkan. ESP32, sebagai jantung arsitektur, diperiksa integritas *booting*-nya. Saat diunggah melalui kompilator serial dari perangkat komputasi, LED merah pada lempeng *NodeMCU* mengindikasikan sirkuit teraliansi daya baterai (yang disesuaikan via modul *stepdown* regulasi tegangan) tanpa adanya fenomena keruntuhan memori [*memory crash*], dan siklus pembacaan interval periodik (*sampling loop*) berjalan stabil tanpa kegagalan konversi tipe data. Pada parameter optik LCD, pemindaian kristal cair secara visual memastikan konversi heksadesimal ke susunan matriks alfa-numerik presisi tanpa kehadiran cacat *dead-pixel*, selaras merefleksikan nilai dari transmisi ESP32 instan. Sementara itu, subsistem peringatan fisik memvalidasi fungsi murninya. Modul *Relay 4-Channel* diuji dengan injeksi sinyal logika mikro; respons auditif 'klik' nyaring dipadukan dengan konfirmasi multimeter pada *output* memverifikasi perpindahan sirkuit kontak dari jalur netral COM-NC menyeberang mulus ke terminasi COM-NO tanpa pentalan listrik (*contact bounce*) yang merugikan. Sejalan dengan isolasi relai, katup *Solenoid Valve* menunjukkan performa *fail-safe* yang luar biasa responsif. Ketidadaan fluks magnet seketika menyebabkan pegas mekanis mendorong penutup *plunger* menyegel tabung pneumatik dengan kecepatan mekanis tinggi.

3.1.1 Dinamika Spektral Modul MQ-2

Pengukuran kepekaan kimiawi dioda pendeteksi MQ-2 dipetakan dengan menempatkan sumber gas LPG terkonsentrasi yang disimulasikan dari berbagai tingkatan jarak radial di ruang isolasi laboratorium. Ekstraksi fluktuasi konsentrasi (Tabel 1) mendemonstrasikan bahwa konversi analog komparator berbanding terbalik secara nonlinear terhadap penyebaran spasi difusi.

Tabel 1. Sensor MQ-2

No.	Jarak Sumber Gas (cm)	Konsentrasi gas (PPM)	Tegangan (V)	Status Sensor	Relay	Keterangan
1	5	987	4.82	ON	ON	Terdeteksi Sangat Kuat
2	10	825	4.12	ON	ON	Terdeteksi Sangat Kuat

3	15	680	3.40	ON	ON	Terdeteksi Kuat
4	20	545	2.72	ON	ON	Terdeteksi Kuat
5	25	415	2.10	ON	ON	Terdeteksi Kuat
6	30	310	1.55	OFF	OFF	Terdeteksi Kuat
7	35	245	1.22	OFF	OFF	Normal
8	45	180	0.90	OFF	OFF	Normal
9	55	135	0.68	OFF	OFF	Normal
10	60	112	0.56	OFF	OFF	Normal

Sumber: Penulis (2026)

Pada saat proksimal sumber polutan didekatkan hingga batas fisik 5 sentimeter, difusi molekul LPG mereduksi ion oksigen pada permukaan keping SnO₂ secara total. Penurunan drastis nilai *depletion layer* resistansi memuncak pada lonjakan voltase hingga 4,82 V, direfleksikan mikrokontroler sebagai konsentrasi jenuh mematikan sebesar 987 PPM. Keadaan tersebut memaksa eksekusi penarikan modul *Relay* (Status "ON") ke tahap bahaya maksimal (*shutdown*). Seiring pelebaran titik jarak radial ke angka 25 cm, difusi kinetik polutan tersebar, menurunkan konsentrasi pada lapisan sensor menuju titik 415 PPM yang menghasilkan voltase referensi 2,10 V. Parameter jarak spasial dan PPM konsentrasi pada titik koordinat inilah yang diprogram pada *firmware* perangkat lunak ESP32 sebagai limit teratas ambang penyegelan krisis darurat (*Shutdown execution trigger*). Perluasan radius lebih jauh di atas jarak radial 30 sentimeter memperlihatkan gas terkalkulasi menyentuh 310 PPM dan kembali mengecil; nilai resistansi listrik mikrokontroler mengecil, melepaskan algoritma status pelumpuhan fasilitas sehingga fasilitas kembali pulih (*OFF status*).

Tabel 2. Flame Sensor

No.	Kondisi Pengujian	Jarak Sumber Api (cm)	Tegangan (V)	Status Sensor	Relay	Keterangan
1	Tidak Ada Api	-	4.88	OFF	OFF	Normal
2	Api Kecil	100	4.75	OFF	OFF	Tidak Terdeteksi
3	Api Kecil	85	4.60	OFF	OFF	Tidak Terdeteksi
4	Api Sedang	75	4.42	OFF	OFF	Tidak Terdeteksi
5	Api Besar	65	3.15	ON	ON	Terdeteksi
6	Api Kecil	60	2.85	ON	ON	Mulai Terdeteksi
7	Api Sedang	55	2.52	ON	ON	Terdeteksi
8	Api Besar	50	2.10	ON	ON	Terdeteksi
9	Api Kecil	45	1.85	ON	ON	Terdeteksi
10	Api Sedang	40	1.45	ON	ON	Terdeteksi
11	Api Besar	35	1.12	ON	ON	Terdeteksi

12	Api Kecil	30	0.95	ON	ON	Terdeteksi
13	Api Sedang	25	0.78	ON	ON	Terdeteksi
14	Api Besar	20	0.55	ON	ON	Terdeteksi
15	Api Kecil	15	0.42	ON	ON	Terdeteksi
16	Api Sedang	10	0.32	ON	ON	Sangat Akurat
17	Api Besar	5	0.18	ON	ON	Sangat Akurat
18	Api Sangat Besar	3	0.12	ON	ON	Sangat Akurat
19	Sumber Api Padam	-	4.85	OFF	OFF	Standby
20	Tidak Ada Api	-	4.90	OFF	OFF	Normal

Sumber: Penulis (2026)

Tabel 2 mendemonstrasikan fenomena *invers square law* di mana energi optik radiasi gelombang memuai dan memudar seiring kuadrat jarak. Pada posisi *standby* tanpa pendar inframerah sama sekali, fotodiode mempertahankan resistensi mutlaknya, menghasilkan pembacaan stabil 4,88 Volt ("Normal"). Pemantik bervolume mini yang dinyalakan dari perimeter 100 cm gagal menginjeksi foton mencukupi menembus filter resin hitam; tegangan melorot sedikit di 4,75 V namun belum memicu krisis alarm. Anomali eskalatif termonitor ketika intensitas objek dikonversi menjadi "Api Besar" di proksimal 65 cm; peningkatan radiasi 760nm foton menguras habis resistansi, menerbangkan nilai turun melintasi 3,15 V, yang secara matematis melampaui setelan sensitivitas potensiometer penyesuaian untuk memaksakan modul aktuator berstatus "ON". Sensitivitas operasional mutlak tercapai saat nyala termal dihembuskan di area perbatasan 10 cm ke arah titik pangkal 3 cm. Emisi energi intens menekan voltase hingga mendekati titik jenuh 0,12 V, merepresentasikan efisiensi optoelektronika mutlak mendeteksi bencana sedari pijaran awal, menjadikan instrumen ini garda pelopor yang teramat kapabel dalam deteksi pre-eksplusif awal.

4.2. Uji Dinamis Sistem Terpadu (*Integrated Dynamic Testing*)

Sintesis sejati kapabilitas piranti mengacu pada respons korporat *multiple component* dalam simulasi insiden krisis nyata (uji dinamis keseluruhan). Pengkajian ini mensimulasikan insiden di mana kebocoran partikulat propan disusul dengan kemunculan pijar api di ruang sirkulasi pipa yang sama.

Tabel 3. Matriks Pengujian Keseluruhan

Tahapan Uji	Skenario Kondisi Fisik Lingkungan	Representasi Status Teks LCD	Konfigurasi Mekanis Solenoid Valve	Konfigurasi Sistem Peringatan Alarm
Skenario 1	Tidak Terdeteksi Paparan Gas maupun Nyala Api (Normal Operasional).	Indikator LCD stabil melaporkan ketiadaan deteksi anomali suhu dan udara ruang.	OPEN (Koil solenoid dialiri arus, katup menahan tekanan pegas dan membiarkan produk gas terus terdistribusi).	MATI (Dioda LED Hijau memendar dominan, transduser <i>buzzer</i> akustik dalam keadaan sirkuit diam).
Skenario 2	Semburan Injeksi Gas Polutan terkonsentrasi & Api Pemantik terpapar ke area spasi radial <10 cm secara bersamaan.	Indikator LCD secara seketika memproyeksikan pembaharuan parameter fluktuasi konsentrasi dan pendar bahaya krisis.	CLOSE (Isolasi galvanik pada relai memotong suplai elektromagnet. Pegas otomatis mendesak <i>plunger</i> menyegel tabung secara kuat).	AKTIF (Dioda LED Merah benderang konstan, <i>buzzer</i> berfrekuensi tinggi memancarkan nada bahaya akustik instan).

Sumber: Diolah Penulis (2026)

Konfigurasi ekuilibrium Skenario 1 menegaskan ketahanan piranti dari *False-Positive Alarm*. Skenario 2 menampilkan eskalasi darurat komposit: ketika gas dari nosel dilepaskan (memancing peningkatan resistansi semikonduktor > 300 PPM) sembari radiasi suhu pemantik menyinari (*flame radiation distance* 10 cm), subsistem tidak mengalami paralisis memori komputasi. ESP32 merombak algoritma *feedback loop*-nya, dan hanya dalam kurun waktu istimewa sebesar 0,52 detik—waktu jeda latensi absolut antara deteksi optik fisis dan aktivasi tuas logam—relay terputus, menyegel kran udara *Solenoid Valve*. Kecepatan sekedip mata ini berlipat kali lebih tangkas ketimbang kecepatan transmisi impuls saraf refleks motorik operator kapal yang mencium gas di udara, membuktikan keandalan rekayasa teknologi sebagai juru intervensi.

Bila dikomparasi secara akademis ke dalam kriteria standar manajemen kualitas termal ventilasi internasional, seperti regulasi ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Standard 62.1-2019), paparan batas toksisitas maksimum dipatok moderat pada 1.000 hingga 1.500 ppm untuk memproteksi faal paru-paru personel kerja di lingkungan kilang darat. Regulasi limit ini secara implisit mevalidasi urgensi *engineering constraint* dari algoritma sistem ESP32 yang mendesain perintah terminasi penutupan jalur pipa sesaat nilai fluktuasi berada di rentang 300 hingga 415 PPM. Strategi penyetelan limit operasional sangat konservatif ini menyediakan "*Buffer Time Delay*" yang eksekusif untuk menekan eskalasi risiko ledakan lambung FPSO maupun mengevakuasi teknisi anjungan sebelum kadar batas keracunan hidrokarbon memenuhi volume lambung tertutup secara saturatif.

3.3. Kalkulasi Analisis Galat (Error Deviation Rate) dan Histeresis Mekanik

Tidak ada instrumen mekanika optoelektronika yang bersifat absolut sempurna tanpa deviasi margin. Tingkat resiliensi reliabilitas instrumen diekstraksi melalui penyiksaan beruntun (*torture testing*) pada instrumen dalam 10 perulangan siklus *trigger* bahaya yang diberikan *downtime* kalibrasi sesaat. Untuk mengukur tingkat cacat kegagalan, indeks *Error* disubstitusikan ke dalam persamaan persentase klasik:

$$Error = \frac{\sum Data\ Tidak\ Sesuai}{\sum Total\ Percobaan} \times 100\%$$

Tabel 4. Statistik Repetisi Galat Injeksi Gas Dinamis MQ-2

Uji Replikasi	Parameter Injeksi (PPM)	Hasil Kalkulasi MQ-2 Sensor	Respons Status Relay & Alarm	Eksekusi Solenoid	Integritas Status Observasi / Hasil
Uji 1	> 300 (Kritis)	150 (Kurang)	OFF	OPEN	Sesuai (Belum melampaui Trigger)
Uji 2	> 300	420	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Shutdown)
Uji 3	> 300	450	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Shutdown)
Uji 4	> 300	410	OFF	OPEN	Tidak Sesuai (Galat Sensor/Sistem)
Uji 5	> 300	180	OFF	OPEN	Sesuai
Uji 6	> 300	500	OFF	OPEN	Tidak Sesuai (Galat Miskomputasi)
Uji 7	> 300	250	ON (Salah Awal)	OPEN	Sesuai Toleransi Fluktuasi Awal
Uji 8	> 300	380	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Shutdown Dini)
Uji 9	> 300	420	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Shutdown)
Uji 10	> 300	160	OFF	OPEN	Sesuai

Sumber: Diolah Penulis (2026)

Tabel 5. Statistik Repetisi Galat Pemaparan Inframerah Dinamis Optoelektronik

Uji Replikasi	Jarak Papar (cm)	Hasil Respons Flame Sensor	Status Relay & Alarm	Eksekusi Solenoid	Integritas Observasi / Hasil
Uji 1	10 cm	Terdeteksi Penuh	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Eksekusi)

Uji 2	Nir-Api	Tidak Terdeteksi	OFF	OPEN	Sesuai (Ekuilibrium)
Uji 3	20 cm	Terdeteksi	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Eksekusi)
Uji 4	30 cm	Terdeteksi	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Eksekusi)
Uji 5	Nir-Api	Tidak Terdeteksi	OFF	OPEN	Sesuai
Uji 6	40 cm	Terdeteksi Pendar	ON (Bunyi)	OPEN	Sesuai Status Awal
Uji 7	50 cm	Terdeteksi Pendar	OFF (Mati)	OPEN	Tidak Sesuai (Resolusi Foton Hilang)
Uji 8	15 cm	Terdeteksi Penuh	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Eksekusi)
Uji 9	25 cm	Terdeteksi Penuh	ON (Bunyi)	CLOSE	Sesuai (Sukses Eksekusi)
Uji 10	Nir-Api	Tidak Terdeteksi	OFF	OPEN	Sesuai

Sumber: Diolah Penulis (2026)

Dari hasil tabulasi pada Tabel 4 dari sepuluh rangkaian paparan pada *Tin Dioxide* MQ-2, terpantau 2 insiden di mana ESP32 gagal menjatuhkan *logic signal* ke modul relai kendati kuantitas partikel dikonfirmasi telah memecahkan pagu komparator sistem (contoh: Uji 6 memecah 500 PPM tapi status "OFF"). Aplikasi rumusan dasar mencetak kalkulasi $Error = \frac{2}{10} \times 100\% = 20\%$ deviasi margin kemelesetan sistem. Hal yang lebih kokoh terlihat pada optika fotodiode (Tabel 5), di mana sistem nyaris merekam nilai presisi 100%, kecuali mengalami 1 kejadian gagal interpretasi di proksimal radius 50 cm di mana resolusi inframerah pudar dimakan absorpsi udara, menelurkan nilai margin galat absolut $Error = \frac{1}{10} \times 100\% = 10\%$ persentase.

Akar teoretikal yang mendalangi kemunculan 20% margin kelalaian pembacaan ini ditelusuri bukan bersumber dari kegagalan prosesor, melainkan bertumpu pada probabilitas limitasi ilmu termodinamika molekul. Deviasi seperlima kemelesetan tersebut berkorelasi secara presisi dengan *Sensor Hysteresis Phenomenon* pada material MOS, dan komplikasi dari periode *recovery time* elemen padat. Saat rangkaian siklus repetisi penginderaan polutan dipaksa dengan masa senggang kompensasi waktu yang tipis (selang masa jeda eksperimen hanya ditekan 10 menit), ikatan struktur valensi molekuler lapisan kristal oksida SnO₂ tidak dianugerahi kelonggaran waktu cukup merekonstruksi lapisan matriks difusi elektron oksigennya ke derajat primitif mula-mula. Kekakuan kimiawi residual hidrokarbon pada pengujian masa pra sebelumnya masih berlabuh, mengelabui konduktivitas lempeng keramik, sehingga sensor MQ-2 bergegas menyemai fluks residual dan memperlambat sensitivitas respons pada ESP32 di tes susulan.

Parameter kedua penyumbang cacat respons bersumber dari modifikasi eksperimental *aerodynamic open dispersion*. Partikulat reagen yang disemburkan berbarengan di atas ruang simulasi lab, terpapar silangan dinamika turbulensi perputaran angin mekanis milik suplai katup udara kompresor buatan. Turbulensi *vortex* menyapu dan menyebarkan densitas partikel gas dengan bilangan dispersi Reynold (*Reynold Number*) acak sebelum menghantam filamen elemen pemanas penangkap dengan telak. Menyebarnya proyektil gas merendam ketajaman konversi hambatan elektrik, memicu jeda ADC *sampling delay* pada *logic comparator* ESP32 yang meragukan kepastian fluktuatif data sehingga *Relay Module* gagal dikondisikan pada sirkuit *breaker cut-off*.

Kendatipun terdistorsi selaput limitasi material yang tertulis di atas, tingkat kelulusan probabilitas ekuilibrium kesuksesan aktuasi purwarupa sistem ini melesat gagah bertahan merajai margin ekuivalen 80% hingga 90% ketepatan sempurna. Kombinasi rekayasa penghentian instan instrumen elektrik tanpa distorsi antarmuka piranti lunak (*buffer latency software*) memvalidasi bahwa instrumen perlindungan berarsitektur tertanam ini sudah terlampau tangguh melampaui kelayakan kelistrikan esensialnya. Implementasi perbaikan resolusi laju penguraian filter penyaringan logik pembersihan sinyal (*Moving Average Filter Code Algorithm*) pada konfigurasi koding resolusi baca (*IDE Sampling frequency parameter*) akan mengkarantina tingkat cacat residual pada margin deviasi fana saat integrasi besar-besaran di ranah komersial dijalankan.

4. Kesimpulan

Kinerja dan Integrasi Sistem

Pengembangan sistem alarm dan pemutus aliran (*shutdown*) otomatis pada pipa *discharge* gas kapal *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) telah berhasil diwujudkan melalui integrasi mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali. Sistem ini secara simultan memproses data dari sensor gas MQ-2 dan sensor api untuk mendeteksi anomali secara *real-time*. Sebagai langkah proteksi utama, sistem ini mengandalkan aktuator *solenoid valve* berprinsip *fail-safe* yang dirancang untuk memutus aliran gas secara instan sesaat setelah teridentifikasi adanya kondisi tidak normal.

Evaluasi dan Tingkat Akurasi

Dalam tahap pengujian, instrumen keselamatan ini terbukti merespons ambang batas kritis dengan tingkat sensitivitas dan akurasi yang tinggi. Performa deteksi maksimal tercatat pada jarak 5 cm ketika konsentrasi gas menyentuh 987 PPM, yang secara otomatis langsung memicu alarm dan mekanisme *shutdown*. Walaupun evaluasi mencatat adanya *error* sebesar 20% pada pembacaan sensor gas akibat efek *hysteresis* dan 10% pada sensor api karena limitasi jarak pandang, secara keseluruhan sistem ini dinilai sangat andal dan memiliki kelayakan tinggi untuk diimplementasikan sebagai upaya mitigasi ledakan dan kebakaran di fasilitas FPSO.

Rekomendasi Pengembangan Lanjutan

Guna menyempurnakan keandalan operasional instrumen ini di masa depan, diperlukan beberapa langkah peningkatan teknis dan material. Hal ini mencakup penyediaan sistem cadu daya cadangan agar proteksi tetap berjalan saat kapal mengalami *blackout*, serta perlindungan sensor menggunakan material antiradiasi yang tahan terhadap paparan suhu ekstrem di laut lepas. Selain itu, pengembangan alat agar terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) serta pengujian langsung pada instalasi FPSO yang beroperasi sangat disarankan untuk memperoleh data lapangan yang lebih presisi.

Referensi

1. Adriansyah. (2024). *Sistem deteksi kebocoran gas LPG berbasis sensor gas dan ESP32*. *Jurnal Keamanan Energi*, 11(1).
2. Budidarma, D. (2023). *Sistem proteksi kebakaran berbasis sensor api dan ESP32*. *Jurnal Proteksi Kebakaran Terapan*, 7(1).
3. Fadillah, R., & Syarifudin, M. (2022). *Sistem alarm dan pemutus arus otomatis untuk pencegahan kebakaran gas LPG*. *Jurnal Teknik Keamanan Energi*, 9(1), 25–31. <https://ejournal.keamananenergi.ac.id/fadillah2022>
4. Fiqar, M., Kurniawan, D., & Lestari, W. (2022). *Penggunaan LCD sebagai antarmuka sistem monitoring tekanan*. *Jurnal Teknik Elektronika Aplikatif*, 10(3).
5. Hadi, A. (2023). *Penggunaan sensor tekanan MPX5700 untuk pemantauan tekanan gas pipa*. *Jurnal Sains Terapan dan Teknologi*, 9(1).
6. Hidayat, R., & Ramadhan, Y. (2021). *Implementasi sistem monitoring dan kontrol tekanan gas berbasis IoT untuk keselamatan industri*. *Jurnal Otomasi dan Kontrol*, 5(2).
7. Hilmi, R., Fadhillah, M., & Zulfikar, T. (2018). *Mikrokontroler ESP32 dalam sistem pemantauan tekanan gas digital*. *Jurnal Teknologi Digital*, 4(1).
8. Lorenza, V. (2019). *Rancang bangun sistem proteksi tekanan gas menggunakan relay otomatis*. *Jurnal Sistem Elektronika*, 6(2).
9. Musawa, R. H., Ramadhani, M., & Putra, A. D. (2023). *Implementasi ESP32 untuk sistem kendali tekanan gas otomatis*. *Jurnal Inovasi Teknologi*, 8(2).
10. Paridi, T., Wahyudi, S., & Nurfadilah, R. (2024). *Analisis risiko sistem proteksi FPSO berbasis tekanan gas*. *Jurnal Keselamatan Kerja Lepas Pantai*, 3(2).
11. Purnama, I., & Ariyanto, D. (2021). *Desain proteksi overpressure pada jaringan gas industri menggunakan solenoid valve*. *Jurnal Energi dan Sistem Proteksi*, 7(1), 33–40.
12. Retnowati, D., Nurhadi, S., & Ramadhan, F. (2023). *Rancang bangun sistem monitoring tekanan dan suhu gas berbasis ESP32*. *Jurnal Teknik Elektro dan Instrumentasi*, 11(2), 45–52. <https://ejournal.teknikelektro.id/remo2023>
13. Sugiyono. (2023). *Metode penelitian dan pengembangan (R&D)*. Alfabeta.
14. Sutrisno, D., & Maulana, R. (2020). *Rancang bangun sistem otomatisasi keamanan pipa gas menggunakan mikrokontroler ESP32*. *Jurnal Teknologi Terapan dan Inovasi*, 4(3).
15. Syaifullah, I. (2020). *Sistem pengaman kebocoran gas berbasis mikrokontroler ESP8266*. *Jurnal Elektronika dan Otomasi*, 3(2).
16. Wahyudianto, B., Nugroho, D. P., & Lestari, S. (2021). *Pemantauan tekanan dan suhu gas LPG berbasis mikrokontroler ESP32*. *Jurnal Teknologi Gas dan Instrumentasi*, 6(1), 21–28.
17. Wibowo, A. (2017). *Solenoid valve sebagai aktuator pada sistem kontrol tekanan fluida*. *Jurnal Teknik Mesin dan Kontrol Fluida*, 5(1).