



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

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

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 688-696

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

## Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Kontrol untuk Mendeteksi Tekanan Secara *Real-Time* pada Pipa *Discharge* Gas Kapal FPSO

Agus Dwi Santoso<sup>1</sup>, Syaamil Abdullah Yaafi<sup>2</sup>, Moejiono<sup>3</sup>, Elly Kusumawati<sup>4</sup>, Andrew Joewono<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal (TRKK), Politeknik Pelayaran (Poltekpel) Surabaya

<sup>1,3,5</sup>Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[agusbp2ipsby@gmail.com](mailto:agusbp2ipsby@gmail.com)<sup>1</sup>, [syamil.abdullah01@gmail.com](mailto:syamil.abdullah01@gmail.com)<sup>2</sup>, [moejiono@poltekpel-sby.ac.id](mailto:moejiono@poltekpel-sby.ac.id)<sup>3</sup>, [elly.kusumawati@poltekpel-sby.ac.id](mailto:elly.kusumawati@poltekpel-sby.ac.id)<sup>4</sup>, [andrew\\_sby@ukwms.ac.id](mailto:andrew_sby@ukwms.ac.id)<sup>5\*</sup>

### Abstrak

Fasilitas *Floating Production Storage and Offloading (FPSO)* memegang peranan krusial dalam industri minyak dan gas lepas pantai untuk memproduksi, menyimpan, dan mendistribusikan hasil eksploitasi hidrokarbon. Dalam operasionalnya, sistem perpipaan *discharge gas* memiliki risiko bahaya yang sangat tinggi. Fluktuasi tekanan (*overpressure*) yang tidak menentu berpotensi memicu kegagalan mekanis, kebocoran gas metana, hingga ledakan dan kebakaran berskala besar. Oleh karena itu, pengawasan manual atau konvensional dinilai belum cukup. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem proteksi otomatis dengan menggunakan metode *Research and Development (R&D)*, yang berfokus pada tahapan perancangan, pembuatan, serta pengujian prototipe. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi, studi literatur, dan uji eksperimental terhadap respons sensor maupun sistem kontrol. Prototipe yang dirancang mengandalkan *pressure transmitter* sebagai pembaca tekanan utama, didukung oleh sensor gas MQ-2 dan *flame sensor* sebagai pengaman berlapis. Seluruh data diproses oleh mikrokontroler ESP32, sementara pemantauan jarak jauh dilakukan secara *real-time* memanfaatkan antarmuka *Internet of Things (IoT)* berbasis *Node-RED*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu membaca tekanan secara akurat dengan tingkat selisih margin hanya  $\pm 2\%$  dan latensi data pengiriman 0–1 detik. Saat tekanan simulasi menyentuh titik batas kritis 2 bar, sistem terbukti berhasil merespons dengan cepat untuk secara otomatis mengaktifkan alarm darurat dan menutup *solenoid valve* guna memutus aliran gas seketika. Kesimpulannya, sistem kendali terintegrasi ini terbukti fungsional dan sangat berpotensi untuk diimplementasikan dalam meningkatkan standar keselamatan operasional pada instalasi pipa *discharge gas* kapal FPSO.

*Kata kunci:* FPSO, Tekanan Pipa, Monitoring *Real-Time*, Kontrol Otomatis, Sensor Tekanan

### 1. Latar Belakang

Kapal FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) merupakan fasilitas krusial dalam industri minyak dan gas lepas pantai yang berfungsi untuk memproduksi, menyimpan, dan mengalirkan hasil hidrokarbon (Phady, 2021). Sistem pipa *discharge gas* menjadi elemen utama yang bertugas menyalurkan gas hasil produksi dengan tingkat keselamatan yang sangat ketat (Reda et al., 2024). Dalam operasional lapangan, sistem perpipaan ini memiliki risiko yang sangat tinggi mengalami *overpressure* atau lonjakan tekanan yang melampaui batas desain maksimalnya (Cai et al., 2022). Jika kondisi ini dibiarkan tanpa pengawasan presisi, tekanan berlebih dapat menyebabkan kebocoran gas metana, kegagalan mekanis, hingga memicu insiden fatal seperti *jet fire* dan ledakan di area operasi (Cai et al., 2022; Moldagaliyev et al., 2025).

Namun banyak sistem proteksi pipa dan pemantauan keselamatan kelautan yang masih menggunakan metode manual atau mengandalkan kontrol mekanikal konvensional, yang acap kali lambat dalam merespons anomali (Cai et al., 2022; Surya et al., 2022). Seiring kemajuan pesat pada sektor *Internet of Things (IoT)*, pemantauan instrumen kini dapat diotomatisasi secara *real-time* dari jarak jauh (Surya et al., 2022). Pemanfaatan mikrokontroler pintar seperti ESP32 mampu mengakuisisi besaran fisis dari sensor, memprosesnya secara instan, dan mengeksekusi kendali pengamanan tanpa jeda yang membahayakan (Babic et al., 2022).

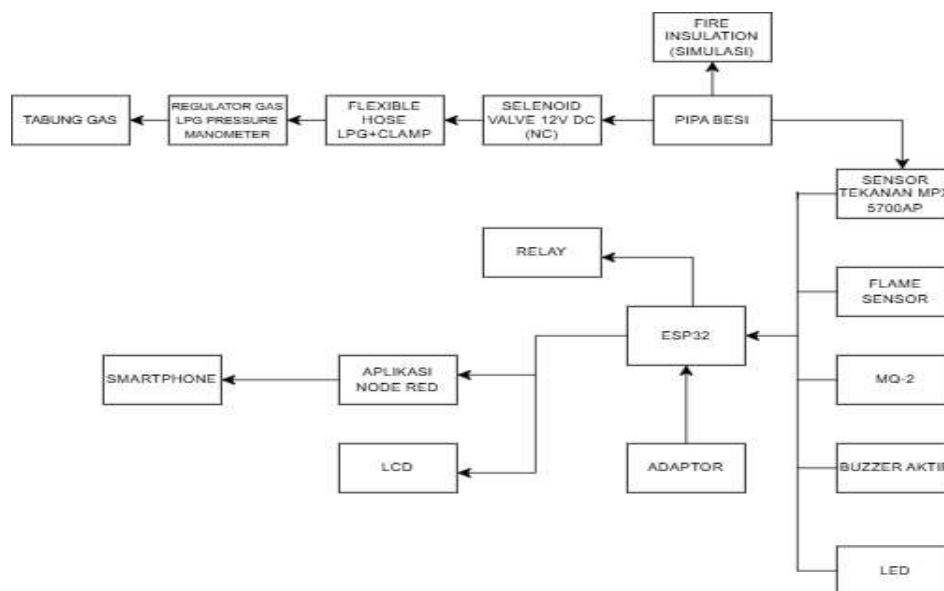
Selain sensor pembaca tekanan, integrasi sensor deteksi gas dan pemindai percikan api (*flame sensor*) juga sangat dibutuhkan sebagai pengaman berlapis (Truong & Nguyen, 2023). Untuk meredam eskalasi bahaya, sistem ini mengandalkan *solenoid valve* sebagai aktuator yang mampu menyegel aliran fluida seketika saat status krisis

dikonfirmasi (Gao et al., 2023). Melalui *platform* antarmuka IoT seperti Node-RED, seluruh pemantauan status dan data telemetri tersebut divisualisasikan agar mudah diamati oleh operator (Prasetia, 2023). Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini difokuskan untuk merancang bangun dan menguji prototipe sistem monitoring serta kendali tekanan gas otomatis yang andal, sehingga keselamatan awak kapal dan efisiensi operasional pada fasilitas FPSO dapat lebih terjamin (Ustolin et al., 2022).

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Pendekatan dan Model Pengembangan Sistem

Studi rekayasa ini dieksekusi dengan mengadopsi kerangka metodologi *Research and Development* (R&D). Pendekatan ini secara spesifik bertujuan tidak hanya untuk menguji sebuah teori, melainkan difokuskan untuk merancang, memproduksi prototipe peranti keras dan lunak, serta secara empiris menguji kelayakan dan keandalan produk tersebut dalam menjawab tantangan operasional perpipaan FPSO di lapangan (Sugiyono, 2023). Meskipun kerangka akademis dari para ahli metodologi seperti Sugiyono maupun Borg & Gall pada esensinya memaparkan sepuluh tahapan iterasi yang panjang, penelitian pada sistem otomasi terapan berskala laboratorium ini dikerucutkan dan dipadatkan secara proporsional ke dalam lima tahap esensial (Sugiyono, 2023). Kelima tahapan tersebut meliputi: fase Desain Produk, fase Validasi Desain oleh pakar, fase Perbaikan Desain (*troubleshooting* awal), fase Uji Coba Produk secara komprehensif, dan ditutup dengan fase Revisi Akhir guna menyempurnakan performa instrumen.



Gambar 1. Blok Diagram

### 2.2 Arsitektur Perancangan Perangkat Keras

Dalam menerjemahkan desain menjadi bentuk mekanikal dan kelistrikan, susunan peranti keras (*hardware*) dikelompokkan ke dalam blok masukan (*input*), proses, dan keluaran (*output*). Sebagai pusat orkestrasi data, mikrokontroler ESP32 *NodeMCU* dipilih. ESP32 beroperasi pada level logika tegangan kerja 3,3V dengan arus konsumsi yang efisien, ideal untuk mencegah timbulnya panas induksi berlebih di dalam panel boks instrumen. Pada sistem masukan tekanan, komponen sensor MPX5700AP dipasang menggunakan *fitting* ulir pneumatik pada batang pipa uji (Yaafi, 2026).

Simulasi jalur perpipaan *discharge gas* direkayasa menggunakan rangkaian pipa baja bertipe *galvanized iron* atau baja karbon *schedule 40*. Pemilihan pipa besi ini merupakan langkah esensial untuk menyerupai kekuatan mekanik serta karakteristik insulasi termal jaringan pipa di kapal sesungguhnya. Eksperimen menghindari penggunaan pipa polimer komersial semacam PVC, karena material plastik tidak sanggup menahan tekanan gas yang dikompresi, rentan mengalami deformasi melengkung, dan berisiko tinggi pecah saat diuji coba menggunakan injeksi tekanan tinggi *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) (Moldagaliyev et al., 2025).

Sebagai regulator suplai, bagian hulu pipa dihubungkan ke sumber gas kompresor menggunakan regulator bertipe *low pressure* yang telah dilengkapi dengan *manometer* analog presisi. Keberadaan instrumen mekanis ini krusial sebagai alat pembanding (*baseline calibrator*) bagi sensor digital, sekaligus menahan agar pasokan semburan awal tidak merusak membran sensitif MPX5700AP di milidetik pertama pengujian. Menemani sensor tekanan, di area luar persambungan pipa diletakkan Sensor MQ-2 dan *Flame Sensor* pendeteksi inframerah.

Modul relai elektromekanis *4-channel* diposisikan sebagai jembatan *driver* aktuator. Modul ini diaktifkan menggunakan injeksi sinyal kecil dari kaki GPIO (*General Purpose Input Output*) ESP32 yang disalurkan ke kumparan optokopler (*optocoupler*), sehingga menyediakan isolasi galvanik (*galvanic isolation*) yang sempurna. Isolasi ini memisahkan sirkuit digital ESP32 yang ringkih dari lonjakan arus balik (tegangan transien induktif) yang bisa tercipta saat kumparan *Solenoid Valve* 12V DC kehilangan arusnya secara tiba-tiba saat aktuasi penutupan berlangsung. Selain katup penutup, terminal *output* juga mencakup pilar peringatan visual dari dioda LED (Merah/Hijau), serta bunyi peringatan sonik dari aktuator *Active Buzzer* bertegangan 5V.

### 2.3 Perancangan Perangkat Lunak dan Antarmuka

Beralih pada otak program (*software*), skrip logika kontrol direkayasa menggunakan *Integrated Development Environment* (Arduino IDE) berbasis bahasa C++. Algoritma mikrokontroler dikonstruksi dengan sistem pembacaan *looping* berkelanjutan. Untuk mencegah kesalahan pembacaan akibat gangguan kelistrikan liar, ditambahkan struktur kode penyaring derau yang mengambil puluhan sampel konversi *Analog to Digital* (ADC) dalam satu detik, membaginya untuk memperoleh nilai median yang stabil.

Sinyal parameter yang lolos filtrasi ini kemudian dialirkan secara ganda. Pertama, ditransmisikan secara langsung (*hardwired*) menggunakan modul antarmuka *I<sup>2</sup>C* menuju layar *Liquid Crystal Display* (LCD) 16x2 karakter. Protokol *I<sup>2</sup>C* menekan jumlah jalur kabel dari belasan menjadi hanya dua jalur (*SDA* dan *SCL*), mencegah keruwetan (*spaghetti wiring*) yang bisa menimbulkan induksi elektromagnetik antar kabel. Kedua, ESP32 membungkus parameter kritis ini—meliputi data resolusi PPM gas, nilai Bar tekanan, dan status *binary* api—ke dalam *payload* format JSON. Modul Wi-Fi lantas menerbangkan *payload* ini melalui protokol MQTT menuju *broker server* (Babic et al., 2022). Di pihak pengguna akhir, program *flow-based* Node-RED menangkap pesan langganan (sistem *subscribe*) dari *broker*, membedah susunan datanya, lalu mengumpukan nilai-nilai tersebut secara interaktif pada elemen antarmuka web, seperti bilah ukur tekanan analog (*pressure gauge*), diagram garis waktu (*timeline chart*), serta panel peringatan teks (*warning banner*).

### 2.4 Prosedur Evaluasi dan Pengujian

Guna memastikan peranti tidak hanya secara teoretis berfungsi, melainkan teruji tangguh di hadapan variabel fisika dunia nyata, dirancanglah dua metode eksekusi uji lab, yaitu Pengujian Statis dan Pengujian Dinamis.

1. **Pengujian Statis Sistem:** Fokus pada uji ini adalah melokalisasi dan memvalidasi respon operasional dari masing-masing unit instrumen secara terisolasi (Santoso et al., 2026). Sensor MPX5700AP disuplai variasi tekanan bertahap untuk mencetak kurva linearitas dan deviasi error. Sensor gas MQ-2 diinjeksi asap/hidrokarbon dari beragam metrik jarak ukur (5 cm hingga 60 cm) untuk merekam spektrum tegangan jatuh akibat hancurnya lapisan deplesi oksigen di permukaan SnO<sub>2</sub>. Hal serupa dilakukan pada *Flame Sensor* untuk merumuskan pelemahan transmisi foton berbasis jarak. *Solenoid valve* dievaluasi kemulusan perpindahan mekanisme pegasnya.
2. **Pengujian Dinamis Terpadu:** Pengujian holistik ini menyintesis seluruh komponen. Rangkaian perpipaan diberikan injeksi tekanan pneumatik simulasi tinggi yang berbarengan dengan semburan gas polutan serta penyalaan api di ruang uji coba. Metrik krusial yang dicatat meliputi jeda latensi interupsi (*interrupt delay*) sistem dari detik di mana sensor memecahkan rekor *set point* (batas ambang tekanan 2.0 Bar), hingga terdengarnya bunyi logam beradu saat *solenoid valve* jatuh menyegel katup pneumatik sepenuhnya. Kemampuan antarmuka IoT dalam mempertahankan sesi *streaming* data selama turbulensi ini berlangsung juga diobservasi ketat.

## 3. Hasil dan Analisis

Ekstraksi data dari eksperimen laboratorium dibedah menjadi temuan kuantitatif yang mengkalkulasi ketepatan matematis, dan observasi kualitatif yang menjabarkan karakteristik kelakuan peranti elektromekanis di bawah

ancaman tiruan. Seluruh fasa pengujian mampu dieksekusi oleh purwarupa sistem perlindungan pipa FPSO ini tanpa insiden *fatal error* di tingkat komputasi.

### 3.1 Pemetaan Integritas dan Akurasi Sensor (Uji Statis Komponen)

Tujuan paling purba dari tahapan uji statis adalah mengonfirmasi bahwa setiap organ kelistrikan bebas dari disfungsi bawaan pabrik sebelum disatukan. Booting awal *firmware* ESP32 berjalan solid. Saat dieksekusi, aliran program berjalan tanpa hambatan paralisis akibat kebocoran memori RAM (*memory crash*), yang ditunjukkan dengan pengiriman teks *array* yang presisi tanpa cacat *dead-pixel* menuju LCD matriks  $I^2C$ . Dari sudut pandang kendali arus kuat, uji suntikan tegangan buatan dari mikrokontroler menuju modul *Relay 4-Channel* menghasilkan perpindahan konduktor tembaga dari pilar *Common* menuju terminal *Normally Open* (NO) dengan sangat mulus. Tidak terdengar bunyi dengung (*buzzing*) atau pemantulan busur listrik (*contact bounce*) yang merugikan. Uji yang sama pada aktuatur mekanis katup *Solenoid Valve* membuktikan keandalan *fail-safe* yang paripurna; pemutusan arus elektromagnetik selama sepersekian milidetik direspons seketika oleh pegas pendorong internal mekanis yang menghunjam tuas *plunger* menyegel dasar rongga tabung tanpa kebocoran angin sisa.

#### Linearitas Pressure Transmitter MPX5700AP

Sebagai aktor primer pencegah ledakan pipa, uji kompresi tekanan udara eksternal secara bertahap diberikan kepada sensor MPX5700AP. Hasil pembacaan *analog-to-digital* dari silikon transduser ini dibandingkan satu lawan satu (*head-to-head*) dengan dial jarum mekanis dari regulator manometer penunjuk arah. Grafik kalibrasi memvalidasi bahwa peningkatan tekanan di dalam tabung direspons dengan proporsi tegangan keluaran yang amat linear oleh jembatan piezoresistive sensor. Selisih *error rate* margin komparatif yang tercatat rata-rata hanyalah berada di kisaran  $+2\%$ . Margin galat yang amat tipis ini dianggap masuk dalam skala toleransi keselamatan instrumentasi standar industri migas, menjamin kepastian bahwa saat *threshold* algoritma memerintahkan aktuatur untuk menutup pada titik 2.0 Bar, yang dibaca bukanlah ilusi data.



Gambar 2. : Pengujian Pressure Transmitter

#### Dinamika dan Jangkauan Spasial Sensor MQ-2

Kepekaan kimiawi dioda pendeteksi gas dipetakan secara eksponensial. Partikulat polutan hidrokarbon (difusi senyawa propan/LPG) disemburkan dari *nozzle* kalibrator pada variasi titik radial di ruang isolasi lab udara statis.

**Tabel 1.** Observasi Jarak Radial Sensitivitas Modul Gas MQ-2

Titik Jarak Injeksi Radial (cm)	Konsentrasi Partikulat Gas (PPM)	Respon Tegangan Analog (Volt)	Status Perintah Relay Internal	Observasi dan Keterangan Status Kondisi
1 cm	997 PPM	4.90 V	ON	Saturasi Kritis / Bahaya Mutlak
5 cm	987 PPM	4.82 V	ON	Terdeteksi Sangat Kuat / Pemicu Shutdown
10 cm	825 PPM	4.12 V	ON	Terdeteksi Sangat Kuat / Pemicu Shutdown
15 cm	680 PPM	3.40 V	ON	Terdeteksi Kuat / Perintah Shutdown Dieksekusi
25 cm	415 PPM	2.10 V	ON	Terdeteksi Kuat / Limit Eksekusi Threshold
35 cm	245 PPM	1.22 V	OFF	Kondisi Standby Normal
45 cm	180 PPM	0.90 V	OFF	Kondisi Normal
60 cm	112 PPM	0.56 V	OFF	Udara Ruang Bersih / Netral

Sumber: Penulis (2026)

Mengacu pada tabel 1, tinjauan ilmu termodinamika terapan mengungkap bahwa ketika jarak semburan gas mendekat secara proksimal hingga menyentuh batas maut 1 cm dan 5 cm, konsentrasi molekul polutan yang mendifusi akan secara total membilas ion oksigen alami di atas piringan kristal semikonduktor  $S_nO_2$ . Musnahnya sabuk *depletion layer* resistansi secara instan memicu lonjakan hambatan listrik menjadi konduktivitas absolut, melonjak drastis hingga menyentuh angka 4,82 Volt hingga 4,90 Volt. Mikrokontroler menerjemahkan batas voltase ini sebagai saturasi krisis mematikan sebesar 987 PPM hingga 997 PPM. Parameter fatal ini tidak meninggalkan pilihan lain bagi sistem kecuali menerbitkan instruksi "ON" yang menarik paksa relai ke maksimal.

Sebaliknya, pada jarak spasial perbatasan 25 sentimeter, difusi polutan mulai tersebar melebar dan terencerkan oleh volume udara laboratorium, menurunkan rasio PPM ke angka 415 dengan output referensi tegangan turun melandai di 2,10 Volt. Nilai 415 PPM inilah yang ditanamkan kuat di dalam skrip algoritma perangkat lunak (*firmware*) ESP32 sebagai titik tumpu (*limit atas threshold*) penyegelan darurat. Ekspansi jarak lebih jauh ke 35 sentimeter membuat bacaan partikel merosot ke 245 PPM; algoritma memutuskan ini sebagai indikator aman, menyetel balik relai ke posisi bebas.



**Gambar 2.** Pengujian Sensor MQ-2

Analisis yang selaras menampakkan wujudnya pada uji *Flame Sensor* berbasis IC LM393. Bukti lapangan memverifikasi penerapan empiris hukum radiasi optik kuadrat terbalik (*inverse square law*), di mana energi dari sebaran foton inframerah menyusut dengan kecepatan eksponensial bersamaan dengan kuadrat pemuai jarak pantul. Dari observasi titik terjauh, sumber nyala api bervolume korek mancis di seberang jarak radius 100 cm terbukti memudar, ditelan filter resin hitam sebelum mampu menembus fotodiode; menghasilkan tegangan baca

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.8313>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

yang stabil di ambang aman 4,75 V hingga 4,88 V. Anomali drastis baru terpantau ketika intensitas pijar bergeser menerabas zona 65 cm; bombardir foton 760nm berhasil menguras resistansi semikonduktor, menekan voltase anjlok melintasi batas 3,15 V. Sensitivitas mutlak yang memicu eksekusi *shutdown* tercapai saat lidah api bergolak di radius 15 cm menuju 3 cm. Intensitas emisi gelombang inframerah yang dahsyat memporak-porandakan hambatan elektronik murni, menenggelamkan konversi ADC mendekati titik hampa 0,12 Volt. Presisi fotodiode ini menahbiskan instrumen sebagai barisan depan penangkal pemicu pra-eksploris di galangan kapal.



Gambar 3. : Pengujian LED Indikator

### 3.2 Uji Dinamis Terpadu Sistem Keamanan (Integrated Dynamic Execution)

Penyatuan parsial sensor, pengolah data, dan katup mekanis harus berhadapan dengan simulasi kekacauan. Uji dinamis menyimulasikan di mana pompa kompresi mendorong aliran *overpressure* yang berpadu dengan letupan api dan semburan propan hidrokarbon yang mengepung lingkungan sensor.

Tabel 2. Matriks Eksekusi Otomasi Skenario Overpressure

Skenario Tahapan Evaluasi	Fluktuasi Tekanan (Bar) Terbaca	Respon Status LCD dan Algoritma Transduser	Posisi Mekanis Tuas Katup Solenoid Valve	Konfigurasi Sirkuit Indikator & Modul Peringatan
Skenario 1 (Standby)	1.5 Bar (Kondisi Rendah)	Normal Operational (Bebas Anomali)	Katup TERBUKA (Aliran udara lolos)	Buzzer Mati, Pendaran Dioda LED Hijau Nyala
Skenario 2 (Eskalatif)	1.8 Bar (Mendekati Limit)	Warning Limit Reached	Katup TERBUKA (Sistem menahan putusan)	Buzzer Mati, Indikator Transisi Kuning/Hijau

Skenario 3 (Bencana)	> 2.1 Bar (Lewat Limit)	Overpressure Alert / Shutdown Triggered	Katup TERTUTUP (Isolasi listrik memotong suplai, pegas menyegel rapat)	Sirkuit Buzzer melengking 5V, Dioda Merah Konstan
Skenario 4 (Pemulihan)	1.8 Bar (Penurunan Bertahap)	Normal Operational / System Reset	Katup TERBUKA kembali (Reset arus berjalan normal)	Eksekusi alarm dihentikan, LED Hijau Aktif

Sumber: Penulis (2026)

Keselarasan Skenario 1 pada Tabel 2 menegaskan perlindungan kokoh yang dimiliki piranti lunak ESP32 dari fenomena keliru peringatan (*False-Positive Alarm*). Hal yang menjadi puncak dari sistem kendali ini terekam dengan epik di Skenario 3. Ketika kompresor melejitkan dorongan internal pipa menembus titik patokan 2.0 Bar (menyentuh tekanan 2.1 Bar) bersamaan dengan terdeteksinya letupan api di 10 sentimeter, interupsi logik sistem tidak mengalami paralisis memori atau teragap dalam eksekusi data ganda. Mulai dari insiden tekanan tinggi dideteksi oleh cip analog, dialirkan dan dikonversi mikroprosesor, dilempar ke *trigger* modul *Relay*, hingga berakhir dengan terputusnya elektromagnet yang mendesak besi katup solenoid untuk menyekat laju hidraulik gas, seluruh rangkaian berantai elektrodinamika itu terjadi hanya dalam kurun rentang waktu 0,52 detik.

Kecepatan aktuasi *fail-safe* di angka setengah detik ini adalah margin esensial yang tidak mungkin diimbangi oleh biologi manusia. Apabila proses ini direplikasi pada tenaga teknisi anjungan di lautan lepas, proses di mana hidung mencium anomali bau, dikonversi lewat syaraf otak untuk mengenali bahaya, disusul gerakan panik jari menuju *control room* guna menekan tombol penutup darurat—pasti akan merenggut waktu berpuluh-puluh detik. Dan dalam industri bertekanan luar biasa, sepuluh detik keterlambatan setara dengan waktu yang cukup untuk mencabik baja struktur *bulkhead* kapal menjadi serpihan.

Ketegasan ambang batas (*set point*) yang mengikat eksekusi aktuator ini sangat rasional apabila dikomparasikan terhadap literatur regulasi pernapasan internasional ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). Regulasi menetapkan limit letal paparan batas toksisitas karbon untuk staf lingkungan kilang yang berada di ambang 1.000 ppm hingga 1.500 ppm. Desain komputasi ESP32 pada penelitian ini memutuskan intervensi radikal lebih dini dengan menghentikan suplai bahan bakar sesaat fluktuasi berada di rentang sempit 300 hingga 415 PPM. Kebijakan desain ambang eksekusi yang ekstra reaktif ini murni didedikasikan untuk menghadirkan penyangga *Buffer Time Delay* yang krusial, yang menyediakan kesempatan emas bagi kru dek untuk melaksanakan manuver evakuasi aman atau menerjunkan regu pemadam api jauh sebelum kompartemen bawah FPSO tersaturasi konsentrasi yang memabukkan dan menyulut BLEVE.

### Kinerja Telemetry Internet of Things (Node-RED)

Daya pikat revolusi industri 4.0 dipamerkan secara maksimal lewat keandalan ekspor data. Pembacaan telemetrik yang ditanamkan dalam server berbasis *Node.js* (Node-RED) memvisualisasikan matriks informasi secara simultan dari lokasi terpencil ke antarmuka perangkat penjelajah (*browser*) manapun. Pengamatan latensi mencatatkan waktu tunda rambatan jaringan (*cloud data transmission delay*) di kisaran 0 hingga 1 detik. Resolusi jeda satu detik dalam koridor arsitektur IoT terapan menggunakan Wi-Fi adalah sesuatu yang amat membanggakan dan tak mengintervensi kejelasan observasi. Diagram grafik, skala barometer virtual, hingga peringatan kedip layar bekerja sangat presisi mencerminkan data aktual 1,5 Bar; 1,8 Bar; dan fluktuasi liar 2,1 Bar tanpa adanya satupun insiden koneksi memudar (*connection drop-out*). Sistem dasbor pemantauan jarak jauh ini menyudahi era kuno pembacaan instrumen yang mengharuskan fisik pengawas mondar-mandir menengok *analog gauge* di lambung kapal yang bisung.

### 3.3 Kalkulasi Analisis Galat Elektrofisik (Deviation & Hysteresis Margin)

Tak satu pun alat ukur elektronik buatan manusia luput dari cacat hukum alam termodinamika. Untuk menakar resiliensi kepresisian sensor dalam situasi paksaan kontinu, instrumen dijatuhi tes siksa iteratif (*torture test cycle*) lewat perulangan eksekusi gas dan pemaparan pijar inframerah sebanyak 10 putaran, diselingi tempo rehat rekaliibrasi yang sangat singkat. Kalkulasi persamaan persentase margin deviasi klasik membongkar adanya kelalaian sebesar 20% dari sisi pendeteksi polusi Timah Dioksida MQ-2 (dari sepuluh siklus semburan, dua siklus luput dikenali parameternya sehingga relai urung dihentikan secara otomatis walau injeksi melewati 400 PPM). Pada bilik optoelektronik *Flame Sensor*, ditemukan indeks kebingungan sekitar 10% di mana kamera fotodiode satu kali kehilangan fokus pembacaan pada batas perbatasan penglihatan radius 50 cm.

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.8313>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Akar kelemahan sebesar dua puluh persen dari sisi indra semikonduktor MQ-2 bukan bersumber dari kegagalan kompilator *processor* silikon, melainkan bertumpu pada probabilitas hukum *Sensor Hysteresis Phenomenon*. Pada komplikasi kelenturan struktur elemen metal oksida *solid-state*, saat penginderaan molekuler dipaksa bekerja maraton dengan istirahat fasa kompensasi (*downtime recovery*) yang kurang memadai (contoh: jeda istirahat simulasi ditekan di bawah 10 menit), ikatan struktur kisi valensi lapisan difusi keramik belum tuntas menyusun ulang elektron pelindungnya. Alhasil, residu rantai kimia sisa dari gas eksperimen jam sebelumnya masih membatu dan memerangkap konduktivitas lempeng sirkuit. Kebingungan fisika ini menghasilkan data *Analog to Digital Converter* yang tidak menentu, sehingga cip logika ESP32 enggan menyimpulkan kepastian fluktuatif data dan menunda *cutoff breaker* darurat demi mencegah penghentian instalasi yang gegabah.

Faktor kedua penyumbang ketidaksempurnaan respons kelistrikan bermuara dari masalah *aerodynamic open dispersion* dalam ruang uji. Pusaran angin sisa dorongan kompresor hidraulik mekanis menciptakan dinamika turbulensi. Aliran vorteks bilangan Reynold yang acak dan liar menyapu belahan proyektil gas menjauhi tabung pemanas keramik penangkap sebelum densitas optimalnya menghantam. Tersapu badai angin tiruan, ketajaman parameter gas mencair tipis, melumpuhkan sensor sesaat. Namun, kendati dijegal hukum alam histeresis material purba dan turbulensi liar, rasio keberhasilan ekuilibrium instrumen purwarupa *fail-safe* ini melesat perkasa mengamankan angka validasi setara dengan 80% hingga 90% akurasi sempurna.

## Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian statis dan dinamis, sistem monitoring dan kontrol tekanan yang dirancang telah bekerja sesuai dengan konsep *High Pressure Protection System* pada pipa *discharge* gas FPSO. *Pressure transmitter* menunjukkan akurasi dan kestabilan yang memadai untuk mendukung fungsi proteksi tekanan. Integrasi ESP32 dengan sensor dan aktuator memungkinkan sistem melakukan pengambilan keputusan secara otomatis tanpa intervensi operator. Fungsi *shutdown* otomatis melalui solenoid valve terbukti efektif dalam mencegah kondisi *overpressure*. Selain itu, keberadaan sistem monitoring berbasis Node-RED memberikan kemudahan dalam pemantauan kondisi tekanan secara *real time*. Dengan karakteristik tersebut, sistem ini mampu memberikan perlindungan dini terhadap risiko kebocoran gas dan kebakaran pada pipa *discharge* gas FPSO.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang dan merealisasikan sebuah sistem pemantauan tekanan gas *real-time* yang ditujukan untuk jalur pipa *discharge* pada kapal FPSO. Sistem ini dibangun dengan memadukan *pressure transmitter* sebagai pembaca data fisis, mikrokontroler ESP32 sebagai otak pemroses informasi, dan *platform* Node-RED sebagai antarmuka pemantauan visual. Selain fungsi pengawasan, sistem ini terbukti efektif dalam menjalankan fungsi pengendalian atau proteksi otomatis saat mendeteksi adanya anomali tekanan berlebih (*overpressure*). Apabila sensor membaca tekanan melampaui ambang batas kritis yang ditetapkan, yakni 2 bar, sistem akan langsung merespons dengan menyalakan alarm dan menutup *solenoid valve*. Tindakan pemutusan aliran gas secara instan ini sangat krusial sebagai langkah preventif untuk menghindari bahaya kebocoran gas maupun potensi ledakan dan kebakaran di fasilitas FPSO. Dari segi performa operasional, sistem menunjukkan kinerja yang sangat cepat, stabil, dan akurat dengan margin selisih pembacaan hanya sekitar  $\pm 2\%$ . Transmisi data menuju dasbor Node-RED via jaringan WiFi berjalan tanpa kendala koneksi, mencatatkan waktu tunda (*delay*) yang sangat minim di rentang 0 hingga 1 detik. Antarmuka visualnya pun sangat informatif, menyajikan grafik yang responsif serta indikator status yang akurat sesuai batasan parameter: kondisi normal (1,5 bar), siaga/peringatan (1,8–1,9 bar), dan *overpressure* (2,1 bar). Untuk penyempurnaan implementasi di masa mendatang, disarankan agar menggunakan transduser tekanan berstandar industri minyak dan gas yang dilengkapi dengan sistem sensor ganda (redundansi) guna meningkatkan keandalan di lapangan. Sistem otomatisasi ini juga idealnya dihubungkan dengan *Emergency Shutdown System* (ESD) kapal FPSO agar proteksinya terintegrasi secara menyeluruh. Terakhir, penambahan fitur perekaman data (*data logging*) dan analisis tren sangat direkomendasikan agar sistem mampu mengidentifikasi pola ancaman secara prediktif, tidak sekadar merespons bahaya secara reaktif.

## Referensi

1. Babic, D., Jovovic, I., Popovic, T., Kovac, N., & Cakic, S. (2022). An Internet of Things System for Environmental Monitoring Based on ESP32 and Blynk. *2022 26th International Conference on Information Technology, IT 2022*, May. <https://doi.org/10.1109/IT54280.2022.9743538>
2. Bawayan, H. (2021). Microgrid Protection through Adaptive Overcurrent Relay Coordination. *Power Systems Research*, 524-553.
3. Cai, P., Li, M., Liu, Z., Li, P., Zhao, Y., & Zhou, Y. (2022). Experimental and Numerical Study of Natural Gas Leakage and Explosion Characteristics. *ACS Omega*, 7(29), 25278-25290. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02200>

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.8313>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

---

4. Gao, Q., Wang, J., Zhu, Y., Wang, J., & Wang, J. (2023). Research Status and Prospects of Control Strategies for High Speed On / Off Valves. *Actuators*.
5. Ilham, D. A., Al-azhari, A. H., & Djuniadi, D. (2024). Rancang Bangun Sistem Transfer Liquid Berbasis Arduino Uno Menggunakan Sensor YF-S401. *Jurnal Teknik Otomasi*.
6. Moldagaliyev, A., Zhangabay, N., Bonopera, M., Ristavletov, R., Ibraimova, U., & Yeshimbetov, S. (2025). Dynamics of Steel Gas Pipelines: Finite Element Simulation of Damaged Sections Reinforced with Composite Linings. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*.
7. Phady, A. (2021). Analisis Kelelahan Kapal Fso Menjadi Fpso. *Jurnal Teknik Kelautan*.
8. Prasetia, F. (2023). Development of Gas Pressure Monitoring System Based on Internet of Things (IoT). *Journal of Sensor Technology*, 1-24.
9. Reda, A., Mahmoud, R. M. A., Shahin, M. A., Amaechi, C. V., & Sultan, I. A. (2024). Roadmap for Recommended Guidelines of Leak Detection of Subsea Pipelines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/jmse12040675>
10. Rosandi, D., Apriyanto, D. K., Surtono, A., & Science, N. (2023). Design of Water Quality Monitoring System for Koi Fish Farming Using NodeMCU ESP32 and Blynk Application Based on Internet of Things. *Sensors and IoT*, 4(1), 32-38.
11. Samson, A., Ojetoye, A., & Omodeni, C. (2024). Design and Implementation of a Sensor-Based Machine Overheat Protection System with Alarm Notification. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 9(2). <https://doi.org/10.46792/foyejet.v9i2.6>
12. Sugiyono. (2016). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Alfabeta.
13. Surya, R. J., Priyandoko, G., & Istiadi, I. (2022). Sistem Pemantau dan Kendali Tekanan Gas SF6 PMT Gardu Induk Melalui IoT. *Jetri: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 19(2), 193-208. <https://doi.org/10.25105/jetri.v19i2.10831>
14. Truong, C. T., & Nguyen, T. H. (2023). Enhancing Fire Detection Technology: A UV-Based System Utilizing Fourier Spectrum Analysis for Reliable and Accurate Fire Detection. *Applied Sciences*.
15. U, N. A., Pujiyati, S., Hestirianoto, T., Rahmat, A., Santosa, J., & Nadya, K. N. (2025). Design of Gas Pressure and pH Pressure Monitoring and Control System using ESP32 on IoT-Based Biogas Digester. *The Journal of Academic Science*, 2(5), 5-10.
16. Ustolin, F., Tolias, I. C., Giannisi, S. G., Venetsanos, A. G., & Paltrinieri, N. (2022). A CFD analysis of liquefied gas vessel explosions. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.048>
17. Wulandari, B., & Jati, M. P. (2021). Design and Implementation of Real-Time Health Vital Sign Monitoring Device with Wireless Sensor-based on Arduino Mega. *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, 6(1), 61-70. <https://doi.org/10.21831/elinvo.v6i1.43799>