Jurnal Ilmiah Teknik Industri dan Inovasi
Volume 4 Nomor 4 Oktober 2026
e-ISSN: 2964-5964; p-ISSN: 2985-315X, Hal. 65-84
DOI: https://doi.org/10.59024/jisi.v4i4.2684
Tersedia: https://jurnal.alimspublishing.co.id/index.php/JISI

Perancangan Sistem Peringatan Dini Bahaya Kebakaran Berbasis *Infrared Fire and Gas Detector* dengan *Voting Logic* 2oo3 dan Verifikasi *Safety Integrity Level* pada Terminal BBM PT XYZ

Muhammad Fikri Baharuddin[1*], Eka Nuryanto Budisusila[2]
[1,2]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia
**Penulis Korespondensi: muhammad.fikri.b@gmail.com*

Abstract. *Fuel terminals store large volumes of volatile hydrocarbons, and a leak can form a flammable vapor cloud that may escalate into a fire or explosion. A root cause analysis at the PT XYZ fuel terminal in Semarang found no fixed vapor cloud detection. This study designs an infrared fire and gas detection-based early warning system that detects leaks, alerts operators, and triggers automatic protection, and verifies its reliability against IEC 61508/61511. Methods include a 5×5 risk matrix, orifice leak rate calculation, Gaussian plume dispersion with 2020–2024 BMKG wind data, 2oo3 voting and electrical design, Layer of Protection Analysis (LOPA), and PFDavg calculation with OREDA data. Leak rates through a 10 mm hole range from 0.32 to 1.45 kg/s, giving conservative 20% LFL hazard radii of 30–66 m. The design uses 22 infrared detectors (21 point IR detectors and one open-path TX/RX pair) in five zones with 2oo3 voting on a 1oo2D Safety PLC, lowering the false alarm probability to 0.12% while keeping the illustrative sensor-group PFD at 0.73%. The total PFDavg is 7.53×10^{-3} (SIL 2) with a risk reduction factor of 133, indicating, based on analytical design verification rather than field performance testing, that the system can serve as a protection layer for the terminal. The motor operated valve contributes 87.2% of the total PFDavg, making final element redundancy the most effective improvement.*

Keywords: *2oo3 Voting; Fire and Gas Detection; Fuel Terminal; LOPA; Safety Integrity Level*

Abstrak. Terminal BBM menyimpan hidrokarbon volatil dalam jumlah besar sehingga kebocoran dapat membentuk *vapor cloud* yang mudah terbakar dan berpotensi berkembang menjadi kebakaran atau ledakan. Analisis akar masalah di Terminal BBM PT XYZ Semarang menunjukkan bahwa fasilitas ini belum memiliki alat pendeteksi akumulasi *vapor cloud* yang terpasang tetap. Penelitian ini merancang sistem peringatan dini berbasis *infrared fire and gas detector* yang mampu mendeteksi kebocoran, memberi peringatan kepada operator, dan mengaktifkan proteksi otomatis, lalu memverifikasi keandalannya terhadap IEC 61508 dan IEC 61511. Penelitian menggunakan pendekatan rekayasa sistem melalui *risk matrix* 5×5, perhitungan laju kebocoran dengan persamaan aliran *orifice*, simulasi dispersi *Gaussian plume* dengan data angin BMKG 2020–2024, pemilihan teknologi sensor, perancangan *voting logic* 2oo3, perancangan kelistrikan, *Layer of Protection Analysis* (LOPA), serta perhitungan PFDavg menggunakan data laju kegagalan OREDA. Laju kebocoran melalui lubang 10 mm berada pada rentang 0,32 sampai 1,45 kg/s dengan radius bahaya 20% LFL secara konservatif sekitar 30 sampai 66 m. Rancangan menggunakan 22 detektor (21 *point IR* dan satu pasang *open path* (TX dan RX)) pada lima zona deteksi dengan *voting* 2oo3 di *Safety PLC* 1oo2D. Konfigurasi 2oo3 menekan peluang *false alarm* menjadi 0,12% dengan PFD kelompok sensor tetap 0,73% pada perbandingan ilustratif. PFDavg total sebesar $7{,}53\times10^{-3}$ (SIL 2) dengan *risk reduction factor* 133, dan *motor operated valve* menyumbang 87,2% dari PFDavg total. Berdasarkan verifikasi analitis rancangan (bukan uji kinerja lapangan), FGDS yang dirancang memenuhi rentang SIL 2 dan target reduksi risiko minimum sehingga berpotensi dijadikan lapisan proteksi bagi terminal. Penambahan redundansi pada elemen final merupakan langkah peningkatan yang paling efektif.

Kata Kunci: Fire and Gas Detection; LOPA; Safety Integrity Level; Terminal BBM; Voting 2oo3

1. LATAR BELAKANG

Minyak dan gas bumi masih menjadi tulang punggung pasokan energi di Indonesia, terutama untuk sektor transportasi dan industri. Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2001 menegaskan bahwa pemerintah wajib menjamin ketersediaan dan kelancaran distribusi bahan bakar minyak (BBM) ke seluruh wilayah (Republik Indonesia, 2001). Kewajiban ini membuat

Naskah Masuk: 26 Agustus 2026; Revisi: 22 September 2026; Diterima: 15 Oktober 2026; Terbit: 26 Oktober 2026

terminal BBM memegang peran penting dalam rantai pasok karena di fasilitas inilah BBM diterima, ditimbun, lalu disalurkan ke konsumen.

Di balik perannya yang vital, terminal BBM termasuk fasilitas dengan risiko kebakaran yang tinggi. Tangki timbun, *manifold*, pompa, dan *loading bay* menangani hidrokarbon volatil dalam jumlah besar, dan kegagalan kecil pada *flange*, *valve*, atau *mechanical seal* dapat melepaskan uap yang mudah terbakar. Kajian risiko pada tangki penyimpanan cairan mudah terbakar menunjukkan bahwa kebakaran tangki dipicu oleh rangkaian kegagalan peralatan, prosedur, dan sistem proteksi yang saling berkaitan (Ramezanifar et al., 2023). Insiden Buncefield di Inggris pada 11 Desember 2005 menjadi contoh nyata ketika luapan bensin dari tangki membentuk *vapor cloud* besar yang kemudian meledak dan menghancurkan sebagian besar terminal (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2008). Di dalam negeri, kebakaran Depo Pertamina Plumpang pada 3 Maret 2023 menimbulkan korban jiwa dan memaksa lebih dari seribu warga di sekitar depo mengungsi (Mutiah et al., 2023). Dua kejadian ini memperlihatkan bahwa dampak kebakaran terminal BBM bisa meluas jauh melewati pagar fasilitas.

Untuk mengendalikan risiko tersebut, area operasi terminal dibagi menjadi zona berbahaya berdasarkan kemungkinan munculnya atmosfer mudah terbakar sesuai API RP 505 (American Petroleum Institute, 2018). Namun klasifikasi area hanya mengatur pemilihan peralatan listrik yang aman dipasang di zona tersebut dan tidak memberi tahu operator ketika kebocoran benar-benar terjadi. Hasil analisis akar masalah menggunakan diagram Ishikawa di Terminal BBM PT XYZ menunjukkan bahwa penyebab utama potensi kebakaran akibat *vapor cloud* adalah belum tersedianya alat pendeteksi akumulasi *vapor cloud* (nilai *severity* 8 dari skala 10), jauh di atas faktor material, lingkungan, metode, dan manusia. Tanpa deteksi dini, uap BBM yang terakumulasi dapat terbawa angin menuju sumber nyala seperti motor listrik atau panel MCC.

Penelitian tentang sistem peringatan dini kebakaran di Indonesia sebenarnya cukup banyak, tetapi sebagian besar masih berskala rumah tangga atau prototipe. Aulia dan Munasir (2022) merancang detektor kebocoran LPG berbasis sensor MQ-2 dan IoT dengan galat pembacaan rata-rata 0,63%. Satria (2023) membangun sistem berbasis Arduino dengan notifikasi SMS *gateway*, Arif dan Astutik (2024) memanfaatkan logika *fuzzy* dan protokol MQTT, sedangkan Waworundeng (2020) mengembangkan deteksi asap dan api berbasis IoT. Penelitian tersebut menggunakan sensor semikonduktor berbiaya rendah dan belum membahas redundansi sensor, sertifikasi area berbahaya, maupun verifikasi keandalan secara kuantitatif. Padahal pada fasilitas migas, sistem proteksi otomatis harus dirancang mengikuti siklus

keselamatan fungsional IEC 61508 dan IEC 61511 agar besarnya reduksi risiko dapat dibuktikan secara terukur (International Electrotechnical Commission [IEC], 2010a, 2016b). Pada skala industri, perancangan *fire and gas system* umumnya telah memadukan penilaian risiko, LOPA, dan target SIL, serta mengevaluasi efektivitas cakupan detektor secara berbasis kinerja (International Society of Automation [ISA], 2018). Di Indonesia, penentuan target SIL berbasis IEC 61511 telah diterapkan pada 1.109 SIF di 12 fasilitas proses (Mukharror et al., 2023). Namun, penerapan kerangka tersebut secara utuh pada terminal BBM di Indonesia, mulai dari analisis dispersi berbasis data angin lokal hingga verifikasi SIL, masih jarang dilaporkan dalam publikasi ilmiah.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan merancang sistem peringatan dini kebakaran berbasis *infrared fire and gas detector* di Terminal BBM PT XYZ yang menempatkan detektor berdasarkan hasil *risk assessment*, simulasi dispersi, dan arah angin dominan, menggunakan *voting logic* 2oo3 untuk menyeimbangkan keandalan deteksi dan *false alarm*, mengaktifkan isolasi jalur BBM dan *water curtain* secara otomatis, serta diverifikasi keandalannya melalui LOPA, perhitungan PFDavg, dan klasifikasi *Safety Integrity Level* (SIL). Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi analisis dispersi, desain kelistrikan instrumentasi, dan verifikasi SIL dalam satu kerangka desain yang dapat langsung diusulkan kepada perusahaan.

2. KAJIAN TEORITIS

Salah satu pendekatan yang banyak dipakai di industri migas adalah *Fixed Gas Detection System* (FGDS) berbasis sensor inframerah. Sensor *Non-Dispersive Infrared* (NDIR) mengukur penyerapan cahaya inframerah oleh ikatan C-H pada molekul hidrokarbon sehingga memiliki selektivitas tinggi dan tidak mengalami *poisoning* seperti sensor katalitik (Fu et al., 2023). Dalam penelitian ini, istilah *infrared fire and gas detector* merujuk pada detektor gas hidrokarbon berbasis inframerah (*point IR* dan *open path*) sebagai elemen deteksi FGDS, sedangkan deteksi nyala api (*flame detector*) tidak termasuk dalam cakupan rancangan.

Keandalan sistem proteksi otomatis pada industri proses dinilai melalui kerangka keselamatan fungsional IEC 61508 dan IEC 61511. Setiap *Safety Instrumented Function* diklasifikasikan ke dalam tingkat *Safety Integrity Level* (SIL) berdasarkan rata-rata peluang gagal saat dibutuhkan (PFDavg); SIL 2, misalnya, berada pada rentang PFDavg 10^{-3} sampai 10^{-2} (IEC, 2010a, 2016b). Besarnya reduksi risiko yang dibutuhkan ditentukan melalui *Layer of Protection Analysis* (LOPA), yaitu metode semi-kuantitatif untuk menilai apakah lapisan proteksi yang tersedia cukup menurunkan frekuensi skenario bahaya hingga di bawah batas

toleransi (Center for Chemical Process Safety [CCPS], 2001). Adapun penempatan detektor gas dapat didasarkan pada model dispersi, sebagaimana Li et al. (2023) memanfaatkan model *Gaussian plume* untuk mendeteksi dan melokalisasi sumber kebocoran gas. Pendekatan lain memanfaatkan simulasi CFD untuk mengoptimalkan posisi detektor terhadap kebocoran gas dari peralatan bertekanan (Liu et al., 2022) maupun metode matematis untuk penempatan rasional sensor gas (Petrov, 2023). Dalam kerangka tersebut perlu dibedakan antara fungsi deteksi gas, SIF, dan lapisan proteksi independen (IPL). Fungsi deteksi gas hanya merupakan subsistem sensor; SIF adalah satu rantai fungsi utuh yang terdiri atas sensor, *logic solver*, dan elemen final untuk membawa proses ke kondisi aman; sedangkan IPL adalah lapisan proteksi yang dapat dikreditkan dalam LOPA apabila bersifat independen, efektif, dan dapat diaudit (CCPS, 2001). Batas verifikasi SIL pada penelitian ini adalah SIF yang terdiri atas detektor *point IR*, *Safety PLC*, dan MOV, sedangkan detektor *open path* dan aktivasi *water curtain* diperlakukan sebagai fungsi pendukung yang tidak dikreditkan dalam perhitungan PFDavg.

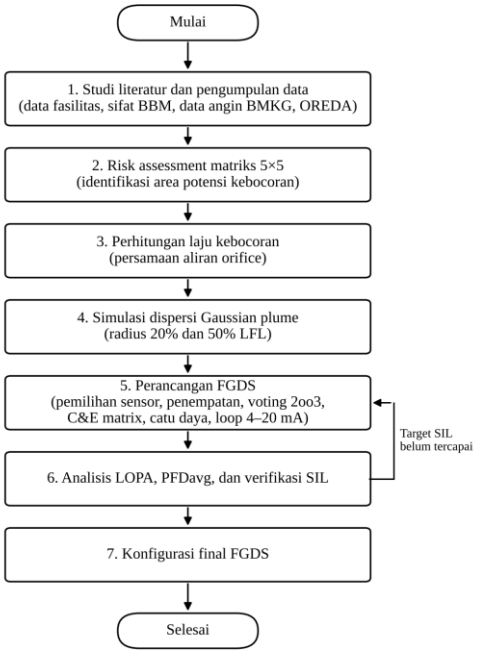
3. METODE PENELITIAN

Jenis dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa sistem (*engineering research*) dengan pendekatan kuantitatif dan studi kasus. Objek penelitian adalah Terminal BBM PT XYZ yang berada di kawasan pesisir Kota Semarang dekat Pelabuhan Tanjung Emas. Terminal ini memiliki sepuluh tangki timbun dengan total kapasitas 125.000 KL untuk tiga jenis BBM, yaitu gasoline, solar, dan avtur, serta dilengkapi *manifold* pipa transfer, enam pompa transfer, *loading bay*, dan tiga unit *fire water pump*. Lokasi ini dipilih karena memiliki konfigurasi fasilitas yang lengkap, menangani BBM dengan tingkat volatilitas berbeda, dan memiliki pola angin darat-laut khas pesisir yang relevan untuk analisis dispersi gas.

Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam tujuh tahap seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tahap pertama adalah studi literatur dan pengumpulan data, meliputi data sarana fasilitas, karakteristik flamabilitas BBM, data angin BMKG Stasiun Meteorologi Semarang periode 2020–2024, serta data laju kegagalan komponen dari OREDA (SINTEF & NTNU, 2015). Tahap berikutnya berturut-turut adalah *risk assessment*, perhitungan laju kebocoran, simulasi dispersi, perancangan FGDS, analisis LOPA dan verifikasi SIL, kemudian penyusunan konfigurasi final. Apabila target SIL belum tercapai, rancangan FGDS dievaluasi ulang.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Penilaian Risiko

Penilaian risiko dilakukan secara semi-kuantitatif menggunakan *risk matrix* 5×5 yang mengacu pada metodologi CCPS (2000). Setiap komponen fasilitas dinilai berdasarkan *likelihood* (L) dan *consequence* (C) pada skala 1 sampai 5, lalu *risk level* dihitung sebagai L×C dengan kategori LOW (1–4), MEDIUM (5–9), HIGH (10–14), VERY HIGH (15–20), dan EXTREME (di atas 20). Hasil penilaian ini menjadi dasar penentuan prioritas dan pembagian zona deteksi. Skor *likelihood* ditetapkan berdasarkan banyaknya titik potensi kebocoran (*flange*, *valve*, dan *mechanical seal*), tekanan operasi, serta frekuensi aktivitas operasional pada setiap fasilitas. Skor *consequence* ditetapkan berdasarkan volume inventori, laju pelepasan potensial, volatilitas BBM (*flash point* dan tekanan uap), serta kedekatan dengan sumber nyala dan area berpenghuni. Data masukan penilaian adalah sarana fasilitas dan karakteristik BBM pada Tabel 1 dan Tabel 2, sehingga skor yang dihasilkan bersifat semi-kuantitatif dan mengandung unsur penilaian rekayasa (*engineering judgement*).

Laju Kebocoran dan Dispersi Gas

Laju pelepasan BBM cair dari lubang kebocoran dihitung menggunakan persamaan aliran melalui *orifice* (Crowl & Louvar, 2011) pada Persamaan (1).

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{(2 \cdot \rho \cdot \Delta P)} \quad \text{(I)}$$

Dengan Q adalah laju pelepasan (kg/s), C_d koefisien *discharge* sebesar 0,62, A luas lubang (m²), ρ massa jenis fluida (kg/m³), dan ΔP beda tekanan terhadap atmosfer (Pa). Diameter lubang diasumsikan 10 mm (A = 7,854×10⁻⁵ m²). Nilai koefisien *discharge* 0,62

merupakan nilai tipikal untuk lubang bertepi tajam, dan diameter 10 mm dipilih untuk mewakili kebocoran kecil yang umum terjadi pada *flange*, *gasket*, atau *seal*. Beda tekanan pada dasar tangki atmosferik diambil 0,3 bar (30.000 Pa) sebagai pendekatan tekanan hidrostatik kolom cairan, sedangkan beda tekanan pada *manifold* dan *discharge* pompa diambil dari tekanan operasi pada Tabel 1. Penyebaran uap dimodelkan dengan *Gaussian plume* untuk sumber kontinu (Crowl & Louvar, 2011; Li et al., 2023). Konsentrasi pada permukaan tanah di sumbu angin ($y = 0$, $z = 0$) dengan pantulan permukaan dinyatakan pada Persamaan (2).

$$C(x,0,0) = [Q / (\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z)] \cdot \exp[-H^2 / (2\sigma_z^2)] \quad \text{(II)}$$

Dengan u adalah kecepatan angin (m/s), H tinggi sumber (m), serta σ_y dan σ_z koefisien dispersi horizontal dan vertikal. Koefisien dispersi dihitung dengan korelasi Briggs untuk area terbuka pada kelas stabilitas Pasquill-Gifford D (netral) (Crowl & Louvar, 2011) seperti Persamaan (3).

$$\sigma_y = 0{,}08x(1 + 0{,}0001x)^{-0,5} \qquad \sigma_z = 0{,}06x(1 + 0{,}0015x)^{-0,5} \quad \text{(III)}$$

Simulasi menggunakan u = 2,5 m/s sebagai kecepatan angin rata-rata dan H = 0,5 m. Nilai u tersebut mendekati rata-rata tertimbang kecepatan angin seluruh arah pada Tabel 5 (sekitar 2,4 m/s), kelas stabilitas D dipilih karena mewakili kondisi atmosfer netral pada kecepatan angin sedang, dan H = 0,5 m mewakili ketinggian tipikal *flange* dan *valve* di atas permukaan tanah. Sebagai skenario terburuk, seluruh massa yang terlepas diasumsikan menjadi uap. Asumsi ini merupakan batasan model karena pada kenyataannya sebagian cairan akan membentuk genangan dan menguap secara bertahap, terutama untuk solar dan avtur. Batas konsentrasi dikonversi dari %vol ke g/m³ dengan asumsi berat molekul uap rata-rata yang sama untuk semua BBM (sekitar 81 g/mol pada 25 °C), sehingga diperoleh LFL gasoline 46,2 g/m³ dan LFL avtur serta solar 19,8 g/m³. Jarak terjauh saat konsentrasi masih di atas 20% dan 50% LFL dicatat sebagai radius bahaya. Model *Gaussian plume* dengan koefisien Briggs dikembangkan untuk gas netral dan jarak yang relatif jauh, sedangkan uap hidrokarbon BBM lebih berat daripada udara dan radius yang dianalisis berada pada orde puluhan meter. Oleh karena itu, model ini digunakan sebagai alat penapisan (*screening*) yang sederhana dan transparan untuk membandingkan skenario serta menentukan orde besaran jarak penempatan detektor, bukan untuk memprediksi konsentrasi secara presisi.

Perancangan FGDS dan *Voting Logic*

Perancangan FGDS mencakup pemilihan teknologi sensor, penentuan jumlah dan posisi detektor, logika *voting*, *Cause and Effect Matrix*, sistem catu daya, serta desain kabel instrumentasi. Logika 2oo3 berarti aksi proteksi baru dijalankan jika minimal dua dari tiga sensor dalam satu kelompok mendeteksi gas melebihi *set point*. Bila peluang gagal satu sensor

adalah *p*, peluang gagal sistem 2oo3 dihitung dengan Persamaan (4). Persamaan yang sama dipakai untuk peluang *false alarm* dengan mengganti *p* menjadi peluang *false alarm* satu sensor *q*.

$$PFD_{2oo3} = 3p^2(1 - p) + p^3 \quad \text{(IV)}$$

Integritas sinyal 4–20 mA diperiksa melalui resistansi *loop* pada Persamaan (5), sedangkan kapasitas baterai cadangan dihitung dengan Persamaan (6).

$$R_{loop} = (\rho_{Cu} / A_k) \cdot L \quad \text{(V)}$$

$$C_{bat} = (I_{total} \cdot t_{backup}) / \eta_d \quad \text{(VI)}$$

Dengan $\rho_{Cu} = 0{,}0172\ \Omega{\cdot}mm^2/m$, A_k luas penampang konduktor (mm^2), L panjang kabel pergi-pulang (m), I_{total} arus beban total (A), t_{backup} waktu cadangan (jam), dan η_d efisiensi pengosongan baterai sebesar 0,8.

LOPA, PFDavg, dan Verifikasi SIL

LOPA digunakan untuk menilai apakah lapisan proteksi yang tersedia cukup menurunkan frekuensi skenario bahaya hingga di bawah batas toleransi (CCPS, 2001). Frekuensi termitigasi dihitung dengan Persamaan (7).

$$f_{mitigated} = f_{initiating} \cdot P_{ign} \cdot \Pi\, PFD_{IPL,i} \quad \text{(VII)}$$

Keandalan *Safety Instrumented Function* dinyatakan dengan PFDavg menurut IEC 61508-6 (IEC, 2010b). Untuk komponen tunggal (1oo1) digunakan Persamaan (8), sedangkan untuk kelompok sensor 2oo3 digunakan Persamaan (9) yang sudah memasukkan kegagalan bersama (*common cause failure*) dengan faktor β.

$$PFD_{1oo1} = \lambda_{DU} \cdot T_I / 2 \quad \text{(VIII)}$$

$$PFD_{2oo3} = (\lambda_{DU} \cdot T_I)^2 + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot T_I / 2 \quad \text{(IX)}$$

Dengan λ_{DU} adalah laju kegagalan berbahaya yang tidak terdeteksi (per jam) dan T_I interval *proof test* sebesar 8.760 jam (1 tahun). Nilai β ditetapkan 5%, berada dalam rentang 1% sampai 10% yang diberikan IEC 61508-6 untuk elemen lapangan (IEC, 2010b). PFDavg total adalah jumlah PFDavg subsistem sensor, *logic solver*, dan elemen final, lalu dibandingkan dengan rentang SIL pada IEC 61508 (IEC, 2010a). Perhitungan menggunakan asumsi *proof test* sempurna (cakupan 100%), waktu perbaikan diabaikan, dan faktor β yang seragam untuk kelompok sensor. Target SIL ditetapkan dari hasil LOPA: kebutuhan RRF minimal 100 setara dengan PFDavg tidak lebih dari 10^{-2}, yaitu batas atas rentang SIL 2, sehingga SIL 2 dijadikan target integritas yang harus dicapai oleh SIF.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fasilitas dan Bahan Bakar

Sarana fasilitas utama Terminal BBM PT XYZ dirangkum pada Tabel 1. Seluruh area proses termasuk Zone 1, sedangkan *fire water pump* dan *control room* berada di *safe area*.

Tabel 1. Sarana fasilitas Terminal BBM PT XYZ

No	Sarana fasilitas	Jumlah	Kapasitas/dimensi	Tekanan operasi
1	Tangki gasoline	5 unit	10.000 KL/unit	Atmosferik
2	Tangki solar	2 unit	10.000 KL/unit	Atmosferik
3	Tangki avtur	3 unit	5.000 KL/unit	Atmosferik
4	*Manifold* pipa transfer	1 sistem	12 inci	5 barg
5	Pompa transfer	6 unit	500 m³/jam/unit	6 barg (*discharge*)
6	*Valve* distribusi	lebih dari 20 unit	8–12 inci	1–6 barg
7	*Loading bay*	1 area	*multi-arm*	3 barg
8	*Fire water pump*	3 unit	1.500 gpm/unit	Tekanan tinggi

Karakteristik flamabilitas ketiga BBM pada Tabel 2 menjadi dasar penentuan prioritas zona dan *set point*. Gasoline memiliki *flash point* −43 °C sehingga pada suhu ambien Semarang (25–35 °C) selalu menghasilkan uap yang cukup untuk membentuk campuran mudah terbakar. Solar dengan *flash point* di atas 52 °C relatif sulit menguap, kecuali jika bocor dari pipa bertekanan dan teratomisasi. Avtur berada di antara keduanya, tetapi memiliki LFL yang lebih rendah sehingga *set point*-nya perlu dibuat lebih sensitif.

Tabel 2. Karakteristik flamabilitas BBM di PT XYZ

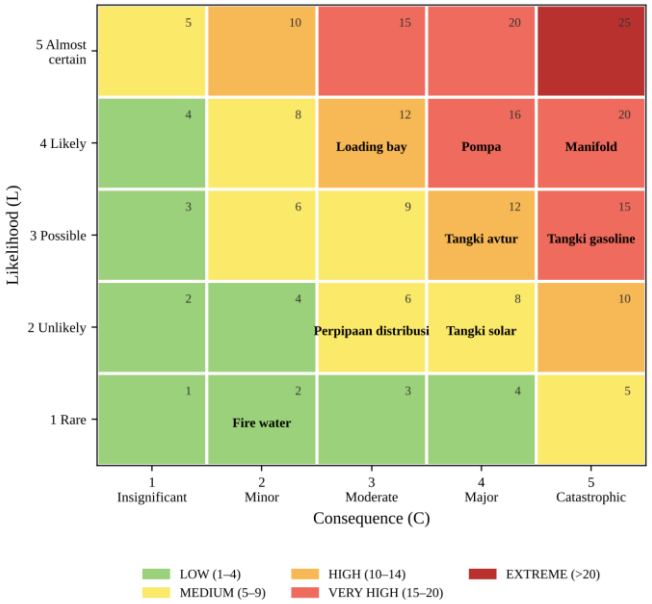
Parameter	Gasoline	Solar	Avtur	Satuan
Flash point	−43	52 s.d. 96	38 s.d. 70	°C
Densitas (25 °C)	720–740	820–840	775–840	kg/m³
LFL	1,4	0,6	0,6	% vol
UFL	7,6	7,5	4,7	% vol
Tekanan uap (25 °C)	53–80	< 0,1	< 1,0	kPa
Risiko *vapor cloud*	Sangat tinggi	Rendah	Sedang	-

Hasil Penilaian Risiko

Hasil *risk assessment* pada Tabel 3 dan Gambar 2 menunjukkan bahwa *manifold* pipa transfer (L×C = 20) dan area pompa transfer (16) memiliki risiko tertinggi. Kedua area ini menggabungkan frekuensi kegagalan mekanis yang tinggi pada *flange*, *valve*, dan *mechanical seal* dengan tekanan operasi yang besar. Tangki gasoline berada pada kategori VERY HIGH (15) karena kapasitasnya terbesar dan *flash point*-nya sangat rendah, sedangkan tangki solar hanya MEDIUM karena volatilitasnya rendah.

Tabel 3. Hasil evaluasi *risk matrix* komponen fasilitas

Komponen	L	C	L×C	Kategori	Zona FGDS
Manifold pipa transfer	4	5	20	VERY HIGH	C (prioritas 1)
Area pompa transfer	4	4	16	VERY HIGH	C (prioritas 1)
Tangki gasoline	3	5	15	VERY HIGH	A (prioritas 2)
Loading bay	4	3	12	HIGH	D (prioritas 3)
Tangki avtur	3	4	12	HIGH	B2 (prioritas 3)
Tangki solar	2	4	8	MEDIUM	B (monitor)
Perpipaan distribusi	2	3	6	MEDIUM	Inspeksi berkala
Fire water system	1	2	2	LOW	Inspeksi rutin



Gambar 2. Posisi komponen fasilitas pada *risk matrix* 5×5

Berdasarkan hasil ini, area deteksi dibagi menjadi Zona A (tangki gasoline), Zona B (tangki solar), Zona B2 (tangki avtur), Zona C (*manifold* dan pompa), dan Zona D (*loading bay*). Pembagian ini tidak menyamaratakan semua area karena mempertimbangkan perbedaan sifat flamabilitas setiap jenis BBM.

Laju Kebocoran Hidrokarbon

Hasil perhitungan laju kebocoran menggunakan Persamaan (1) ditunjukkan pada Tabel 4. Sebagai contoh, untuk *manifold* pipa gasoline dengan ΔP = 5 bar diperoleh Q = 0,62 × 7,854×10^{-5} × √(2 × 740 × 500.000) = 1,32 kg/s. Laju kebocoran pada *manifold* dan *valve discharge* pompa sekitar empat kali lebih besar daripada kebocoran pada dasar tangki karena tekanannya jauh lebih tinggi. Temuan ini sejalan dengan hasil penilaian risiko yang menempatkan Zona C sebagai prioritas utama.

Tabel 4. Hasil perhitungan laju kebocoran (C_d = 0,62, d = 10 mm)

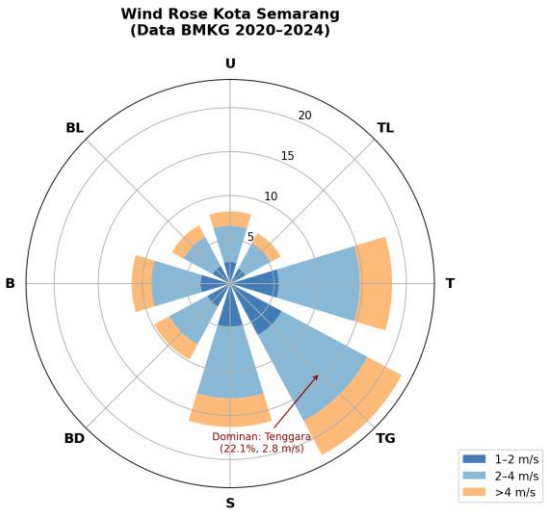
Skenario	Fluida	ρ (kg/m³)	ΔP (Pa)	Q (kg/s)
Tangki gasoline	Gasoline	740	30.000	0,32
Tangki avtur	Avtur	800	30.000	0,34
Tangki solar	Solar	820	30.000	0,34
Manifold pipa	Gasoline	740	500.000	1,32
Valve discharge pompa	Gasoline	740	600.000	1,45

Pola Angin dan Hasil Simulasi Dispersi

Data angin BMKG periode 2020–2024 pada Tabel 5 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa arah angin dominan berasal dari tenggara dengan frekuensi 22,1% dan kecepatan rata-rata 2,8 m/s, disusul angin timur (18,4%) dan selatan (16,3%). Kondisi ini penting karena pada angin tenggara uap dari *tank farm* gasoline akan bergerak ke arah *control room*, sedangkan angin timur membawa uap menuju area pompa yang memiliki sumber nyala potensial berupa motor listrik dan panel MCC.

Tabel 5. Distribusi arah angin Kota Semarang periode 2020–2024

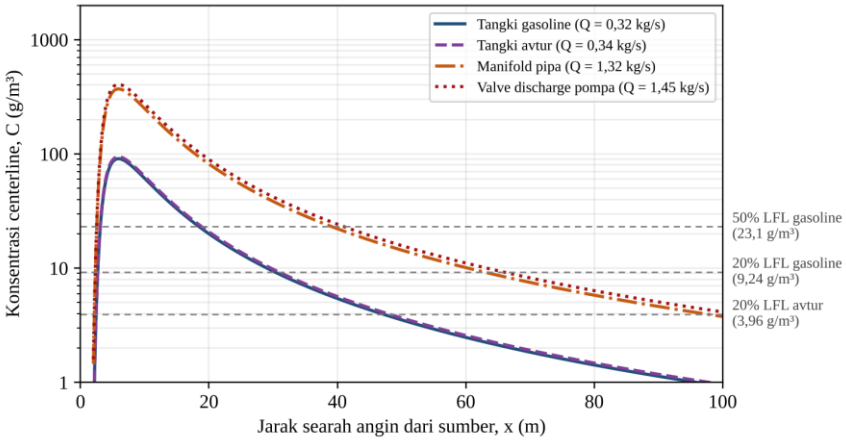
Arah	Frekuensi (%)	Kec. rata-rata (m/s)	Arah	Frekuensi (%)	Kec. rata-rata (m/s)
Utara	8,2	2,1	Selatan	16,3	2,6
Timur laut	6,5	1,8	Barat daya	9,8	2,0
Timur	18,4	2,5	Barat	11,2	2,3
Tenggara	**22,1**	**2,8**	Barat laut	7,5	1,9



Gambar 3. *Wind rose* Kota Semarang periode 2020–2024 (diolah dari data BMKG)

Profil konsentrasi pada sumbu angin untuk empat skenario utama ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan radius bahaya dirangkum pada Tabel 6. Kebocoran pada *valve discharge* pompa menghasilkan radius 20% LFL terjauh, yaitu sekitar 66 m, diikuti *manifold* pipa sekitar 63 m. Untuk tangki avtur dan solar, radius 20% LFL mencapai sekitar 48 m karena LFL

keduanya lebih rendah daripada gasoline. Khusus solar, angka ini adalah batas atas karena pada suhu ambien laju penguapannya jauh lebih kecil daripada laju kebocoran cairannya.



Gambar 4. Profil konsentrasi *Gaussian plume* pada sumbu angin untuk empat skenario kebocoran

Tabel 6. Radius bahaya hasil simulasi *Gaussian plume* (u = 2,5 m/s, kelas D)

Skenario	Q (kg/s)	Radius 50% LFL (m)	Radius 20% LFL (m)	Jarak detektor ke sumber (m)
Tangki gasoline	0,32	18	30	8–12
Tangki avtur	0,34	30	48	5–10
Tangki solar	0,34	30[a)]	48[a)]	5–10
Manifold pipa	1,32	39	63	3–5
Valve discharge pompa	1,45	41	66	2–5

a) Batas atas, karena solar sulit menguap pada suhu ambien sehingga laju uap aktual jauh lebih kecil.

Hasil ini memiliki dua implikasi desain. Pertama, rentang jarak pada Tabel 6 merujuk pada detektor terdekat dari sumber pada setiap skenario, sedangkan rentang pada Tabel 8 mencakup seluruh detektor dalam zona, termasuk detektor *barrier*. Seluruh detektor dipasang pada jarak 2 sampai 12 m dari sumber kebocoran sehingga berada jauh di dalam radius 20% LFL setiap skenario. Artinya, kebocoran diperkirakan dapat terdeteksi sebelum uap menyebar ke area yang lebih luas. Kedua, pada jarak 30 sampai 40 m dari *manifold* konsentrasi masih di atas 50% LFL, sehingga detektor gas harus merespons dengan cepat agar alarm dan isolasi bekerja sebelum *vapor cloud* mencapai sumber nyala. Oleh karena itu spesifikasi detektor mensyaratkan waktu respons T90 kurang dari 30 detik dengan kinerja yang diuji sesuai IEC 60079-29-1 (IEC, 2016a).

Pemilihan Teknologi Sensor

Empat teknologi sensor dibandingkan pada Tabel 7. Teknologi inframerah dipilih sebagai sensor utama karena tiga alasan. Pertama, lokasi PT XYZ berada di kawasan pesisir dengan kelembaban relatif 70–90% dan udara bergaram, sementara sensor katalitik mudah menurun kinerjanya dan rentan *poisoning*. Kedua, sensor NDIR mendeteksi ikatan C-H

sehingga satu platform sensor dapat dipakai untuk gasoline, avtur, maupun solar (Fu et al., 2023). Ketiga, keluaran 4–20 mA dengan protokol HART memungkinkan *set point* tiap zona diatur dari *control room* tanpa harus memasuki area berbahaya. Detektor *point IR* digunakan untuk sumber kebocoran yang lokasinya pasti, sedangkan *open path* digunakan untuk memotong lintasan uap di perimeter *tank farm*.

Tabel 7. Perbandingan teknologi sensor gas

Parameter	IR point (NDIR)	IR open path	Katalitik	Elektrokimia
Target gas	Hidrokarbon	Hidrokarbon	Gas mudah bakar	Gas beracun spesifik
Waktu respons T90	< 30 detik	< 10 detik	< 30 detik	< 60 detik
Kerentanan *poisoning*	Tidak ada	Tidak ada	Tinggi	Sedang
Toleransi kelembaban	Sangat baik	Baik	Terbatas	Rendah
Umur operasional	5–10 tahun	7–10 tahun	2–3 tahun	2–4 tahun
Biaya perawatan	Rendah	Rendah	Tinggi	Sedang
Kesesuaian untuk BBM	Sangat baik	Sangat baik	Baik	Tidak sesuai

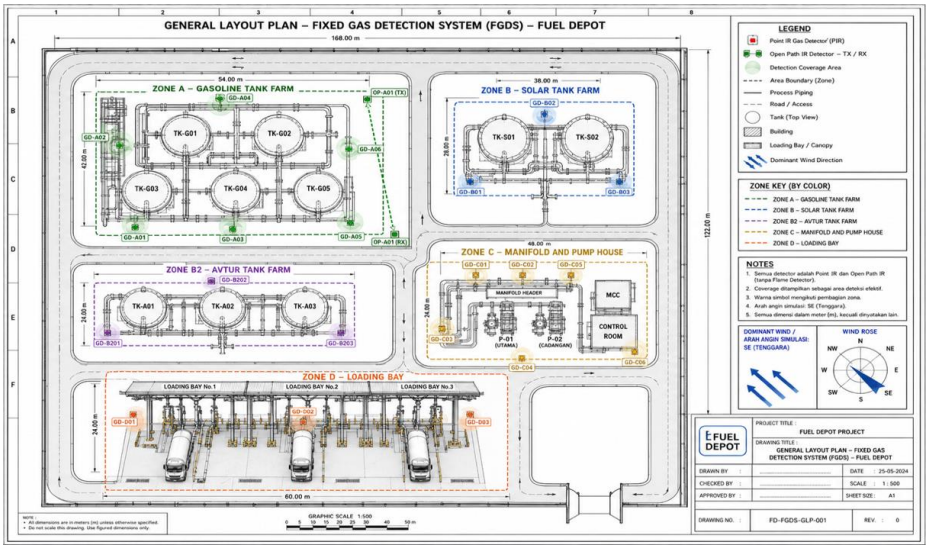
Penempatan Detektor dan *Voting Logic* 2oo3

Penempatan detektor mengintegrasikan hasil *risk assessment*, radius dispersi, dan arah angin dominan. Setiap detektor ditempatkan lebih dekat ke sumber daripada radius 20% LFL dan diprioritaskan di sisi hilir angin tenggara dan timur. Konfigurasi akhir terdiri atas 22 detektor, yaitu 21 *point IR* dan satu pasang *open path* (TX dan RX), seperti dirangkum pada Tabel 8 dan Gambar 5. Pada Zona A dan Zona C yang masing-masing memiliki enam *point IR*, *voting* 2oo3 diterapkan per kelompok tiga sensor yang berdekatan. Dengan demikian, Zona A dan Zona C masing-masing memiliki dua kelompok *voting* 2oo3, sedangkan Zona B, Zona B2, dan Zona D masing-masing memiliki satu kelompok *voting* 2oo3 dari tiga *point IR*. Detektor *open path* di perimeter Zona A berfungsi sebagai deteksi pendukung untuk memotong lintasan uap; sinyalnya ditampilkan sebagai alarm di HMI, tetapi tidak dimasukkan ke dalam kelompok *voting* 2oo3 maupun perhitungan PFDavg.

Tabel 8. Ringkasan penempatan detektor FGDS per zona

Zona	Area	Detektor	Jarak ke sumber (m)	Set point L1/L2	Dasar penempatan
A	Tangki gasoline	6 point IR + 1 open path	8–12	20/50% LFL	Sisi selatan dan timur, hilir angin tenggara dan timur
B	Tangki solar	3 point IR	5–10	20/50% LFL	Atap tangki, pipa antartangki, valve inlet
B2	Tangki avtur	3 point IR	5–10	15/35% LFL	Sisi selatan tangki, pipa, valve outlet
C	*Manifold* dan pompa	6 point IR	2–6	20/50% LFL	*Flange*, *valve*, *mechanical seal*, sisi arah MCC

Zona	Area	Detektor	Jarak ke sumber (m)	Set point L1/L2	Dasar penempatan
D	*Loading bay*	3 point IR	3–6	20/50% LFL	*Loading arm* dan perimeter hilir angin



Gambar 5. *General layout plan* FGDS Terminal BBM PT XYZ

Pemilihan konfigurasi 2oo3 dibuktikan secara probabilistik pada Tabel 9 dengan asumsi peluang gagal satu sensor p = 0,05 dan peluang *false alarm* satu sensor q = 0,02. Nilai p dan q tersebut merupakan asumsi ilustratif untuk membandingkan arsitektur *voting* secara relatif, sehingga PFD 0,73% pada Tabel 9 tidak sama dengan PFDavg subsistem sensor pada Tabel 13 yang dihitung dari data laju kegagalan OREDA dan interval *proof test*. Konfigurasi 1oo2 memang memiliki PFD terendah, tetapi peluang *false alarm*-nya naik menjadi 3,96%. Sebaliknya, konfigurasi 3oo3 hampir bebas *false alarm* tetapi PFD-nya membengkak menjadi 14,3% karena kegagalan satu sensor saja membuat sistem tidak mampu merespons. Konfigurasi 2oo3 memberikan keseimbangan terbaik dengan PFD 0,73% dan peluang *false alarm* hanya 0,12%, atau sekitar 3% dari nilai 1oo2.

Tabel 9. Perbandingan probabilistik konfigurasi *voting*

Konfigurasi	PFD sistem	Peluang *false alarm*	Keterangan
1oo1	0,0500	0,0200	Sederhana, PFD tinggi
1oo2	0,0025	0,0396	PFD rendah, *false alarm* tinggi
2oo3 (dipilih)	**0,00725**	**0,00118**	**Seimbang**
2oo2	0,0975	0,0004	PFD buruk
3oo3	0,1426	0,000008	PFD sangat buruk

Respons sistem diatur secara bertahap melalui *Cause and Effect Matrix* pada Tabel 10. Pada level L1, sistem hanya memberi peringatan audio-visual agar operator dapat memeriksa lapangan. Pada level L2, *Safety PLC* menutup *Motor Operated Valve* (MOV) pada jalur BBM zona terkait dan mengaktifkan *fire pump* untuk membentuk *water curtain* yang menekan dan

mengencerkan *vapor cloud*. Jika L2 aktif pada dua zona sekaligus atau tombol *manual override* ditekan, sistem menjalankan *Emergency Shutdown* (ESD) penuh.

Tabel 10. *Cause and Effect Matrix* sistem FGDS

Penyebab	Alarm HMI	Sounder Dan Beacon Lokal	MOV Tutup	Fire Pump Dan Water Curtain	ESD Penuh
L1 Zona A/C/D, 1 sensor	●	-	-	-	-
L1 Zona A/C/D, 2oo3	●	●	-	-	-
L2 Zona A/C/D, 2oo3	●	●	●	●	-
L1 Zona B2 (15% LFL), 2oo3	●	●	-	-	-
L2 Zona B2 (35% LFL), 2oo3	●	●	●	●	-
L1 Zona B (20% LFL), 2oo3	●	● (sounder)	-	-	-
L2 Zona B (50% LFL), 2oo3	●	●	●	● (water curtain)	-
L2 aktif pada 2 zona	●	●	●	●	●
Manual override	●	●	●	●	●

Perancangan Kelistrikan dan Logic Solver

Sistem catu daya menggunakan suplai 230 VAC yang dikondisikan oleh UPS *online double-conversion*, kemudian diubah menjadi 24 VDC oleh SMPS. Perhitungan beban pada Tabel 11 menghasilkan arus total 12,88 A atau 309,1 W setelah ditambah cadangan 15%. Dengan target autonomi 72 jam dan Persamaan (6), kapasitas baterai yang dibutuhkan adalah (12,88 × 72) / 0,8 = 1.159 Ah. Kapasitas ini dipenuhi dengan bank baterai 24 V 1.200 Ah, misalnya 12 unit baterai VRLA 12 V 200 Ah yang disusun 2 seri × 6 paralel.

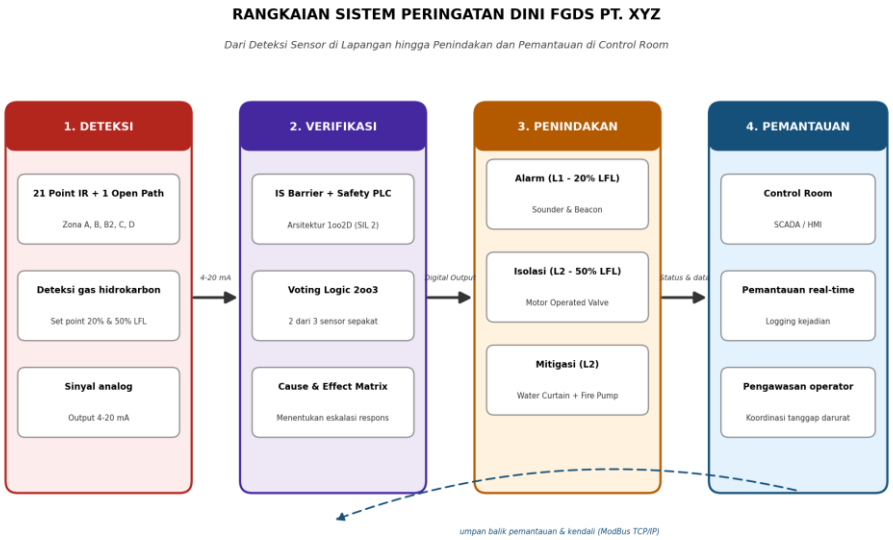
Tabel 11. Perhitungan beban kelistrikan sistem FGDS

Komponen	Jumlah	Arus/unit (mA)	Total arus (mA)	Daya pada 24 V (W)
Point IR gas detector	21	200	4.200	100,8
Open path (TX dan RX)	2	500	1.000	24,0
Safety PLC 1oo2D dan modul I/O	1 set	900	900	21,6
Sounder	8	300	2.400	57,6
Beacon	8	200	1.600	38,4
Relay dan *IS barrier*	22	50	1.100	26,4
Cadangan 15%	-	-	1.680	40,3
Total			**12.880**	**309,1**

Untuk kabel instrumentasi 2×1,5 mm² dengan panjang rata-rata 100 m (200 m pergi-pulang), Persamaan (5) menghasilkan $R_{loop} = (0{,}0172/1{,}5) \times 200 = 2{,}29\ \Omega$. Pada jarak terjauh 150 m nilainya 3,44 Ω. Batas maksimum resistansi *loop* adalah (24 − 18)/0,02 = 300 Ω, sehingga integritas sinyal seluruh detektor terjamin. Setiap *loop* dilewatkan melalui *IS barrier* tipe Zener [Ex ia] IIC (U_i = 28 V, I_i = 93 mA, P_i = 1,5 W) sesuai IEC 60079-11 (IEC, 2023), dan instalasinya mengikuti IEC 60079-14 (IEC, 2024).

Logic solver menggunakan *Safety PLC* berarsitektur 1oo2D (*one out of two with diagnostics*) dengan *hardware fault tolerance* 1, *diagnostic coverage* sekitar 90%, dan *safe*

failure fraction di atas 90%. Kombinasi ini memenuhi batasan arsitektur IEC 61508-2 untuk SIL 2 (IEC, 2010a). *Safety PLC* harus menyediakan minimal 22 kanal *analog input*, 12 kanal *digital output*, dan komunikasi ModBus TCP/IP ke SCADA. Rantai fungsi sistem secara utuh, mulai dari deteksi di lapangan hingga pemantauan di *control room*, ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Rantai fungsi sistem peringatan dini FGDS dari deteksi hingga pemantauan

Analisis LOPA

LOPA dilakukan pada skenario paling kritis, yaitu *vapor cloud explosion* akibat kebocoran gasoline pada *manifold* yang tersulut sumber nyala di area pompa. Lembar kerja LOPA disajikan pada Tabel 12. Frekuensi kebocoran *manifold* diambil 0,1 per tahun dan peluang penyulutan 0,1, sehingga frekuensi VCE tanpa proteksi adalah 1×10^{-2} per tahun. Kedua nilai tersebut merupakan nilai generik yang lazim digunakan dalam LOPA (CCPS, 2000, 2001) dan belum dikalibrasi dengan data kegagalan historis terminal. Dengan batas toleransi 1×10^{-4} per tahun, dibutuhkan *risk reduction factor* (RRF) minimal 100.

Tabel 12. Lembar kerja LOPA skenario VCE akibat kebocoran *manifold*

Parameter	Nilai	Keterangan
Frekuensi *initiating event*	0,1 /tahun	Kebocoran pipa atau *flange*
Peluang penyulutan (P_{ign})	0,1	Sumber nyala di area pompa
Frekuensi VCE tanpa proteksi	1×10^{-2} /tahun	$0,1 \times 0,1$
Batas toleransi risiko	1×10^{-4} /tahun	Target perancangan
IPL 1: BPCS	PFD 0,1	Sistem kendali proses
IPL 2: respons operator	PFD 0,1	Waktu respons memadai
IPL 3: FGDS (rancangan)	PFD $7,53\times10^{-3}$	Hasil Tabel 13
Frekuensi termitigasi	$7,53\times10^{-7}$ /tahun	$1\times10^{-2} \times 0,1 \times 0,1 \times 7,53\times10^{-3}$
RRF total	$\approx 1,33\times10^{4}$	Jauh di atas target 100
RRF FGDS saja	133	Memenuhi target ≥ 100

Jika ketiga lapisan proteksi dihitung, frekuensi VCE turun menjadi $7,53\times10^{-7}$ per tahun. Namun, respons operator pada praktiknya dipicu oleh alarm FGDS, dan BPCS berpotensi

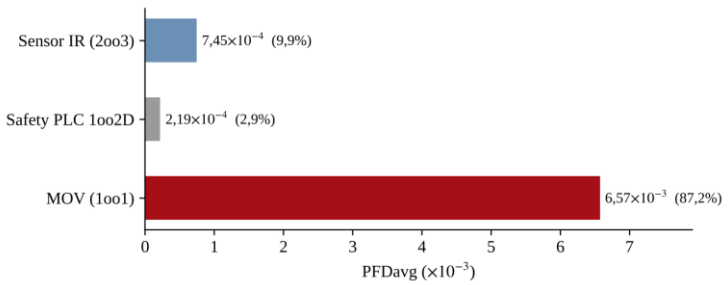
berbagi sensor, *logic solver*, atau elemen final dengan FGDS, sehingga independensi keduanya terhadap FGDS belum dapat dipastikan. Oleh karena itu, klaim utama penelitian ini didasarkan pada skenario konservatif tanpa kredit BPCS dan respons operator, sedangkan perhitungan dengan tiga lapisan proteksi hanya ditampilkan sebagai pembanding. Pada skenario ini FGDS sendiri harus menghasilkan RRF minimal 100 atau PFDavg tidak lebih dari 1×10^{-2}, dan hasil perhitungan pada subbab berikut menunjukkan bahwa syarat ini terpenuhi.

Perhitungan PFDavg dan Verifikasi SIL

Laju kegagalan λ_{DU} yang digunakan adalah $2{,}0\times10^{-6}$ per jam untuk *point IR detector*, $5{,}0\times10^{-8}$ per jam untuk *Safety PLC*, dan $1{,}5\times10^{-6}$ per jam untuk MOV, mengacu pada OREDA (SINTEF & NTNU, 2015). Hasil perhitungan dengan Persamaan (8) dan (9) dirangkum pada Tabel 13. Subsistem sensor 2oo3 menghasilkan $(1{,}752\times10^{-2})^2 + 0{,}05 \times 1{,}752\times10^{-2} / 2 = 7{,}45\times10^{-4}$. Suku *common cause* ($4{,}38\times10^{-4}$) ternyata lebih besar daripada suku kegagalan independen ($3{,}07\times10^{-4}$). Hal ini menunjukkan bahwa keandalan kelompok sensor sangat bergantung pada upaya menekan kegagalan bersama, misalnya melalui pemisahan kabel dan jadwal kalibrasi yang tidak serentak.

Tabel 13. Ringkasan perhitungan PFDavg sistem FGDS (T_I = 1 tahun)

Subsistem	Konfigurasi	λ_{DU} (/jam)	PFDavg	Kontribusi
Sensor *point IR*	2oo3, β = 5%	$2{,}0\times10^{-6}$	$7{,}45\times10^{-4}$	9,9%
Safety PLC	1oo2D	$5{,}0\times10^{-8}$	$2{,}19\times10^{-4}$	2,9%
MOV (elemen final)	1oo1	$1{,}5\times10^{-6}$	$6{,}57\times10^{-3}$	87,2%
Total			**$7{,}53\times10^{-3}$**	**100%**



Gambar 7. Kontribusi PFDavg setiap subsistem FGDS

PFDavg total sebesar $7{,}53\times10^{-3}$ berada pada rentang 10^{-3} sampai 10^{-2}, sehingga sistem FGDS terklasifikasi SIL 2 menurut IEC 61508 (IEC, 2010a) dengan RRF sebesar 133. PFDavg *Safety PLC* dihitung secara konservatif dengan pendekatan 1oo1 efektif (Persamaan 8) karena data *diagnostic coverage* per kanal dan faktor β dari pabrikan belum tersedia. Perhitungan dengan arsitektur 1oo2D yang memperhitungkan kanal redundan akan menghasilkan nilai yang lebih kecil, sehingga pendekatan ini merupakan batas atas dan tidak mengubah klasifikasi SIL 2. Klasifikasi SIL 2 tersebut merupakan hasil verifikasi analitis terhadap PFDavg; pemenuhan

batasan arsitektur untuk subsistem sensor dan MOV serta *systematic capability* seluruh komponen tetap perlu dikonfirmasi berdasarkan sertifikat SIL pabrikan pada tahap pengadaan. Gambar 7 memperlihatkan bahwa MOV menyumbang 87,2% dari PFDavg total. Artinya, upaya peningkatan keandalan paling efektif bukan menambah sensor, melainkan memperbaiki elemen final. Jika MOV dibuat redundan 1oo2 dengan laju kegagalan yang sama, PFDavg elemen final turun menjadi $(\lambda_{DU}T_I)^2/3 + \beta\cdot\lambda_{DU}T_I/2 = 3{,}86\times10^{-4}$ dan PFDavg total menjadi $1{,}35\times10^{-3}$. Nilai ini masih SIL 2 tetapi sudah mendekati batas SIL 3, dan RRF naik menjadi sekitar 740. Cara lain adalah memperpendek interval *proof test* MOV atau memilih aktuator dengan fitur *partial stroke testing*.

Pembahasan

Dibandingkan penelitian sistem peringatan dini kebakaran di Indonesia yang umumnya berbasis sensor MQ-2 dan mikrokontroler untuk skala rumah tangga (Arif & Astutik, 2024; Aulia & Munasir, 2022; Satria, 2023; Waworundeng, 2020), rancangan ini menggunakan sensor inframerah bersertifikasi area berbahaya, redundansi 2oo3, dan *logic solver* bersertifikasi SIL. Perbedaan paling mendasar terletak pada cara pembuktian kinerja. Penelitian sebelumnya umumnya mengukur akurasi pembacaan sensor, sedangkan penelitian ini membuktikan besarnya reduksi risiko melalui LOPA dan PFDavg sesuai kerangka IEC 61508 dan IEC 61511 (IEC, 2010a, 2016b). Pendekatan berbasis model dispersi untuk menentukan posisi sensor juga sejalan dengan penelitian Li et al. (2023) yang memanfaatkan *Gaussian plume* untuk deteksi dan lokalisasi kebocoran, serta dengan studi penempatan detektor berbasis simulasi dan optimasi (Liu et al., 2022; Petrov, 2023). Perbedaannya, penelitian ini memadukan penentuan posisi detektor dengan verifikasi SIL dalam satu kerangka desain.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, model *Gaussian plume* dengan koefisien Briggs pada dasarnya dikembangkan untuk jarak di atas 100 m dan untuk gas netral, sedangkan uap BBM lebih berat daripada udara. Kedua, asumsi seluruh massa kebocoran menjadi uap cenderung memperbesar radius bahaya. Ketiga, laju kegagalan diambil dari basis data generik sehingga nilainya perlu disesuaikan dengan data pabrikan saat tahap pengadaan. Keempat, rancangan belum diuji secara fisik di lapangan. Uap yang lebih berat daripada udara dapat menyebar mendatar di dekat permukaan dan terakumulasi di area rendah, sehingga bentuk awan dan konsentrasinya dapat berbeda dari prediksi *Gaussian plume*. Selain itu, kecepatan angin di bawah 2,5 m/s yang juga tercatat pada Tabel 5 akan menghasilkan konsentrasi yang lebih tinggi. Karena belum dilakukan analisis sensitivitas maupun validasi, radius bahaya pada Tabel 6 sebaiknya dibaca sebagai estimasi indikatif, bukan jaminan bahwa

rancangan selalu berada di sisi aman. Implikasinya bagi penerapan di lapangan, posisi dan ketinggian detektor perlu dikonfirmasi melalui pemodelan gas berat atau pemetaan cakupan detektor (ISA, 2018), PFDavg perlu dihitung ulang menggunakan data sertifikat pabrikan dan interval *proof test* aktual, dan kinerja sistem baru dapat dinyatakan setelah melalui *Factory Acceptance Test*, *Site Acceptance Test*, serta *proof test* berkala.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah menghasilkan rancangan sistem peringatan dini bahaya kebakaran berbasis *infrared fire and gas detector* untuk Terminal BBM PT XYZ. Penilaian risiko menempatkan *manifold* pipa transfer dan area pompa sebagai area paling kritis, dengan laju kebocoran 1,32 sampai 1,45 kg/s pada lubang 10 mm. Simulasi *Gaussian plume* dengan kecepatan angin 2,5 m/s dan stabilitas kelas D menghasilkan radius bahaya 20% LFL secara konservatif sekitar 30 sampai 66 m, sehingga penempatan detektor pada jarak 2 sampai 12 m dari sumber diperkirakan meningkatkan peluang kebocoran terdeteksi sejak dini, dengan catatan rancangan ini belum diuji di lapangan.

Sistem FGDS dirancang dengan 22 detektor inframerah (21 *point IR* dan satu pasang *open path* (TX dan RX)) pada lima zona deteksi, *voting logic* 2oo3, *Safety PLC* 1oo2D, serta respons bertahap berupa alarm pada level L1 dan isolasi MOV ditambah *water curtain* pada level L2. Konfigurasi 2oo3 menekan peluang *false alarm* menjadi 0,12% dengan PFD kelompok sensor 0,73% pada perbandingan ilustratif. Verifikasi keandalan secara analitis menghasilkan PFDavg total $7{,}53\times10^{-3}$ yang masuk kategori SIL 2 dengan RRF 133, sehingga secara analitis FGDS sendiri sudah memenuhi target reduksi risiko minimum 100. Klasifikasi ini masih perlu dikonfirmasi dengan data sertifikat pabrikan dan pengujian lapangan sebelum sistem diimplementasikan.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan simulasi dispersi gas berat dan penguapan genangan menggunakan perangkat lunak seperti PHAST atau ALOHA, menambahkan redundansi atau *partial stroke testing* pada MOV yang menjadi penyumbang terbesar PFDavg, dan melaksanakan *Factory Acceptance Test*, *Site Acceptance Test*, serta *proof test* tahunan apabila rancangan ini diimplementasikan.

DAFTAR REFERENSI

American Petroleum Institute. (2018). *API RP 505: Recommended practice for classification of locations for electrical installations at petroleum facilities classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2* (2nd ed.). API.

Arif, M. Z., & Astutik, R. P. (2024). Sistem pendeteksi kebocoran gas pada LPG dan suhu ruangan berbasis protokol MQTT menggunakan metode fuzzy logic. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, *6*(2), 109. https://doi.org/10.30595/jrre.v6i2.24304

Aulia, I., & Munasir, M. (2022). Rancang bangun alat deteksi kebocoran gas LPG serta penanggulangan kebakaran menggunakan sensor MQ2 dan sensor api berbasis IoT. *Jurnal Fisika Unand*, *11*(3), 306–312. https://doi.org/10.25077/jfu.11.3.306-312.2022

Buncefield Major Incident Investigation Board. (2008). *The Buncefield incident 11 December 2005: The final report of the Major Incident Investigation Board* (Vol. 1). Health and Safety Executive.

Center for Chemical Process Safety. (2000). *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis* (2nd ed.). American Institute of Chemical Engineers.

Center for Chemical Process Safety. (2001). *Layer of protection analysis: Simplified process risk assessment*. American Institute of Chemical Engineers.

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2011). *Chemical process safety: Fundamentals with applications* (3rd ed.). Prentice Hall.

Fu, L.; You, S.; Li, G.; & Fan, Z. (2023). Enhancing methane sensing with NDIR technology: Current trends and future prospects. *Reviews in Analytical Chemistry*, *42*(1), 20230062. https://doi.org/10.1515/revac-2023-0062

International Electrotechnical Commission. (2010a). *IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems* (Parts 1–7, 2nd ed.). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2010b). *IEC 61508-6: Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3* (2nd ed.). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2016a). *IEC 60079-29-1: Explosive atmospheres - Part 29-1: Gas detectors - Performance requirements of detectors for flammable gases* (2nd ed.). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2016b). *IEC 61511: Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector* (2nd ed.). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2023). *IEC 60079-11: Explosive atmospheres - Part 11: Equipment protection by intrinsic safety "i"* (7th ed.). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2024). *IEC 60079-14: Explosive atmospheres - Part 14: Electrical installations design, selection and installation of equipment, including initial inspection* (6th ed.). IEC.

International Society of Automation. (2018). *Guidance on the evaluation of fire, combustible gas, and toxic gas system effectiveness* (ISA-TR84.00.07-2018). ISA.

Li, D.; Liu, G.; & Mao, Z. (2023). Leak detection and localization in multi-grid space using improved Gaussian plume model. *Sensors*, *23*(13), 6209. https://doi.org/10.3390/s23136209

Liu, R.; Deng, H.-B.; Mou, C.-L.; Wang, L.-Y.; Wang, F.; Xiong, X.-Y.; & Li, Y.-D. (2022). FLACS-based simulation of combustible gases leaked from the pressure device for the optimizing of gas detectors' setup. *Safety*, *8*(3), 53. https://doi.org/10.3390/safety8030053

Mukharror, D. A.; Devianto, H.; & Widyotriatmo, A. (2023). Mining safety integrity level (SIL) determination study results: Evaluating safety integrity level (SIL) targets of 1,109 safety instrumented functions (SIFs) in 12 process facilities in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, *2879*, 020170. https://doi.org/10.1063/5.0126037

Mutiah, T.; Setyawan, A.; Muharam, F.; Rahmi, M.; Fitriyanto; Raharjo, A.; Nurdiansyah, C.; Rafiq, A.; & Hutasoit, K. N. (2023). Respon krisis kebakaran Depo Pertamina Plumpang dalam analisa situational crisis communication theory. *NIVEDANA: Jurnal Komunikasi dan Bahasa*, *4*(1), 37–56. https://doi.org/10.53565/nivedana.v4i1.814

Petrov, A. (2023). Mathematical method of rational placement of gas fire sensors. *Sensors*, *23*(20), 8349. https://doi.org/10.3390/s23208349

Ramezanifar, E.; Gholamizadeh, K.; Mohammadfam, I.; & Mirzaei Aliabadi, M. (2023). Risk assessment of methanol storage tank fire accident using hybrid FTA-SPA. *PLoS ONE*, *18*(3), e0282657. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282657

Republik Indonesia. (2001). *Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2001 tentang Minyak dan Gas Bumi*.

Satria, D. (2023). Sistem peringatan dini kebakaran dan kebocoran gas LPG berbasis notifikasi SMS gateway. *Jurnal Informatika*, *2*(2), 9–13. https://doi.org/10.57094/ji.v2i2.1025

SINTEF & NTNU. (2015). *OREDA: Offshore and onshore reliability data handbook* (6th ed.). OREDA Participants.

Waworundeng, J. M. S. (2020). Desain sistem deteksi asap dan api berbasis sensor, mikrokontroler dan IoT. *CogITo Smart Journal*, *6*(1), 117–127. https://doi.org/10.31154/cogito.v6i1.239.117-127