

Analisis Risiko Kebakaran dan Ledakan Akibat Kegagalan Operasional Pada Stasiun Pengumpul Minyak di PT XYZ

Rama Indra Jaya*, I Putu Artama Wiguna

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: ramaindrajaya@gmail.com*

Keywords:

Risk, Fire, Explosion, HAZOP, MAH, ETA, PHAST, Oil Gathering Station.

Abstract

The oil and gas industry has a high level of process safety risk due to the flammable characteristics of hydrocarbons, which may lead to major accidents such as fires and explosions. The Oil Gathering Station of PT XYZ faces increasing safety challenges due to production expansion, limited storage capacity, aging equipment, and operational failures that may result in hydrocarbon loss of containment. This study aims to identify potential hazards, analyze dominant accident scenarios, and evaluate the consequences of fire and explosion risks at the PT XYZ Oil Gathering Station. A combined qualitative and quantitative approach was applied using Hazard and Operability Study (HAZOP), Event Tree Analysis (ETA), and consequence modeling through PHAST software. The results indicate that the primary hazards originate from hydrocarbon releases caused by process deviations, including instrumentation failure, corrosion, high pressure, and ineffective isolation systems. The analysis identified ISO_03L as the most critical area due to its highest potential for liquid pool formation and pool fire scenarios, while prolonged release duration was significantly influenced by delayed manual isolation. PHAST simulation results demonstrated potential thermal radiation exposure and impact propagation to several facility components, although most scenarios remained within acceptable risk criteria. This study concludes that strengthening active protection systems, improving critical equipment reliability, implementing automatic isolation systems, and enhancing emergency response preparedness are essential strategies to minimize fire and explosion risks in oil and gas facilities.

Kata Kunci:

Risiko, Kebakaran, Ledakan, HAZOP, MAH, ETA, PHAST, Stasiun Pengumpul Minyak.

Abstrak

Industri minyak dan gas bumi memiliki tingkat risiko keselamatan proses yang tinggi karena karakteristik hidrokarbon yang mudah terbakar dan berpotensi menyebabkan kecelakaan mayor seperti kebakaran dan ledakan. Stasiun Pengumpul Minyak PT XYZ menghadapi tantangan peningkatan risiko akibat peningkatan target produksi, keterbatasan kapasitas penyimpanan, usia peralatan, serta potensi kegagalan operasional yang dapat menyebabkan kehilangan containment hidrokarbon. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi bahaya, menganalisis skenario kecelakaan dominan, serta mengevaluasi konsekuensi kebakaran dan ledakan

pada fasilitas Stasiun Pengumpul Minyak PT XYZ. Metode penelitian menggunakan pendekatan kombinasi kualitatif dan kuantitatif melalui Hazard and Operability Study (HAZOP), Event Tree Analysis (ETA), serta simulasi konsekuensi menggunakan perangkat lunak PHAST. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahaya utama berasal dari pelepasan hidrokarbon (hydrocarbon release) akibat deviasi proses seperti kegagalan instrumentasi, korosi, tekanan tinggi, dan kegagalan sistem isolasi. Analisis menunjukkan bahwa ISO_03L menjadi area paling kritis dengan potensi liquid pool dan pool fire tertinggi, sedangkan peningkatan durasi pelepasan terjadi akibat keterlambatan isolasi manual. Simulasi PHAST menunjukkan adanya potensi paparan radiasi panas dan penyebaran dampak terhadap fasilitas tertentu, meskipun sebagian besar masih berada dalam batas penerimaan risiko. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penguatan sistem proteksi aktif, peningkatan keandalan peralatan kritis, penerapan sistem isolasi otomatis, dan peningkatan kesiapsiagaan tanggap darurat diperlukan untuk mengurangi risiko kebakaran dan ledakan pada fasilitas migas.

PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi memiliki peranan penting dalam penyediaan energi nasional, namun di sisi lain juga menghadapi tantangan besar terkait aspek keselamatan, keandalan operasi, serta keberlanjutan produksi. Stasiun Pengumpul (SP) Mangunjaya merupakan salah satu fasilitas vital yang berfungsi untuk mengumpulkan, menyimpan, dan menyalurkan minyak bumi hasil produksi dari sumur-sumur yang ada di sekitarnya. Saat ini, tingkat produksi minyak di SP Mangunjaya mencapai sekitar 883 barel minyak per hari (BOPD). Seiring dengan target pengembangan lapangan, pada tahun 2024 ditetapkan program pemboran sebanyak 14 sumur baru, dengan target tambahan 12 sumur lagi pada tahun 2025. Setiap sumur pemboran diharapkan mampu menghasilkan produksi sekitar ± 100 barel minyak per hari. Kondisi ini tentu memberikan peluang peningkatan produksi yang signifikan, namun juga menimbulkan tantangan terkait kapasitas penyimpanan, pengolahan, serta pengelolaan risiko keselamatan pada fasilitas.

Permasalahan pertama yang muncul adalah keterbatasan kapasitas tangki produksi. Saat ini SP Mangunjaya hanya memiliki tiga tangki dengan total kapasitas 6000 barel. Jika target pemboran sumur baru tercapai, tambahan produksi minyak akan sulit ditampung dengan kapasitas tangki yang ada. Hal ini berpotensi menimbulkan risiko kelebihan kapasitas (overfilling) yang dapat menyebabkan tumpahan minyak maupun tekanan berlebih. Oleh karena itu, diperlukan upaya mitigasi berupa penambahan fasilitas penampungan atau optimasi sistem distribusi agar volume minyak dari produksi baru dapat ditangani secara aman.

Faktor lain yang turut memperbesar potensi bahaya adalah degradasi material dan infrastruktur akibat umur fasilitas yang telah mencapai lebih dari 15 tahun. Penuaan material berpotensi menurunkan keandalan sistem dan meningkatkan risiko kebocoran fluida bertekanan tinggi. Menurut Center for Chemical Process Safety (CCPS, 2010), faktor usia peralatan merupakan salah satu penyebab dominan dalam kejadian loss of containment yang sering berkembang menjadi kebakaran atau ledakan. Oleh karena itu, analisis risiko berbasis

data aktual diperlukan untuk menilai sejauh mana kondisi peralatan masih memenuhi standar keselamatan.

Stasiun Pengumpul (SP) Mangunjaya PT XYZ merupakan salah satu fasilitas penting dalam rantai produksi minyak yang memiliki fungsi mengumpulkan, memisahkan, menyimpan, dan menyalurkan hidrokarbon dari beberapa sumur produksi. Peningkatan target produksi melalui program pemboran sumur baru memberikan peluang peningkatan kapasitas produksi, tetapi pada saat yang sama meningkatkan kompleksitas risiko operasional, terutama terkait keterbatasan kapasitas penyimpanan, peningkatan inventory hidrokarbon, serta kemampuan sistem proteksi dalam menghadapi kondisi abnormal. Berdasarkan kondisi eksisting, fasilitas SP Mangunjaya memiliki tiga tangki penyimpanan dengan kapasitas total 6000 barel, sementara peningkatan produksi berpotensi menyebabkan tekanan tambahan terhadap sistem penyimpanan dan pengolahan. Selain itu, sebagian peralatan telah beroperasi lebih dari 15 tahun sehingga menghadapi risiko degradasi material, korosi, dan penurunan keandalan peralatan. Faktor usia fasilitas tersebut menjadi perhatian karena kegagalan integritas mekanik dapat menyebabkan pelepasan hidrokarbon bertekanan tinggi yang berpotensi berkembang menjadi kebakaran maupun ledakan.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengembangkan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi risiko kebakaran dan ledakan pada fasilitas minyak dan gas. Penelitian Bouasla et al. (2020) menunjukkan bahwa kombinasi metode HAZOP, fault tree analysis, dan event tree analysis mampu memberikan identifikasi bahaya serta estimasi probabilitas kecelakaan secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan kualitatif konvensional. Chen et al. (2022) mengembangkan metode perhitungan kuantitatif terhadap cakupan kecelakaan pada fasilitas pengumpulan dan transportasi minyak dengan mempertimbangkan karakteristik pelepasan hidrokarbon serta konsekuensi fisiknya. Selain itu, penelitian Shahang et al. (2020) membuktikan bahwa integrasi analisis probabilitas kejadian dengan pemodelan konsekuensi dapat meningkatkan akurasi dalam menentukan tingkat risiko kebakaran dan ledakan pada fasilitas energi. Penelitian lain oleh Li et al. (2018) juga menunjukkan bahwa penggunaan perangkat lunak PHAST efektif dalam memprediksi dampak pelepasan hidrokarbon melalui simulasi dispersi gas, radiasi panas, dan tekanan ledakan. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa pendekatan berbasis risiko menjadi metode yang semakin banyak digunakan dalam pengambilan keputusan keselamatan proses di industri migas.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas analisis risiko kebakaran dan ledakan pada fasilitas migas, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang perlu dikaji lebih lanjut. Sebagian penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada fasilitas penyimpanan skala besar seperti tangki LPG, terminal energi, maupun kilang minyak, sementara kajian yang secara spesifik mengintegrasikan identifikasi bahaya, probabilitas kegagalan, dan analisis konsekuensi pada fasilitas stasiun pengumpul minyak dengan kondisi operasi aktual masih relatif terbatas. Selain itu, banyak penelitian hanya mengevaluasi potensi kejadian berdasarkan satu metode analisis, misalnya HAZOP atau simulasi konsekuensi saja, tanpa menghubungkan hasil identifikasi bahaya dengan perkembangan skenario kecelakaan dan efektivitas lapisan proteksi yang tersedia. Kondisi tersebut menyebabkan kebutuhan terhadap pendekatan terpadu yang mampu menggambarkan hubungan antara sumber bahaya, probabilitas kejadian, jalur eskalasi, serta dampak akhir terhadap manusia dan fasilitas. Oleh karena itu, diperlukan

penelitian yang menggabungkan metode HAZOP, ETA, dan PHAST untuk menghasilkan evaluasi risiko yang lebih menyeluruh dan aplikatif pada fasilitas produksi minyak.

Urgensi penelitian ini semakin meningkat karena karakteristik fasilitas SP Mangunjaya memiliki beberapa faktor risiko yang berpotensi memperbesar dampak kecelakaan, seperti tingginya inventory hidrokarbon, keterbatasan sistem isolasi, usia peralatan, serta keberadaan fasilitas pendukung dan permukiman masyarakat di sekitar area operasi. Kejadian kebakaran atau ledakan pada fasilitas pengumpulan minyak tidak hanya berpotensi menyebabkan kerusakan aset perusahaan, tetapi juga dapat mengancam keselamatan pekerja, masyarakat sekitar, dan keberlangsungan produksi energi. Oleh karena itu, evaluasi risiko tidak cukup hanya dilakukan berdasarkan kepatuhan terhadap standar keselamatan, tetapi harus mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai kemungkinan kejadian dan tingkat dampak yang dapat terjadi. Hasil analisis tersebut dapat menjadi dasar bagi manajemen dalam menentukan prioritas mitigasi, meningkatkan keandalan sistem proteksi, serta mengoptimalkan strategi tanggap darurat berbasis skenario kecelakaan yang realistis.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan integratif HAZOP, ETA, dan PHAST untuk mengevaluasi risiko kebakaran dan ledakan pada fasilitas Stasiun Pengumpul Minyak PT XYZ dengan menggunakan data operasional aktual. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya melakukan analisis bahaya atau simulasi konsekuensi secara terpisah, penelitian ini menghubungkan proses identifikasi deviasi operasi melalui HAZOP dengan analisis jalur perkembangan kecelakaan menggunakan ETA serta pemodelan dampak fisik menggunakan PHAST. Integrasi ketiga metode tersebut memungkinkan penelitian menghasilkan gambaran risiko yang lebih komprehensif, mulai dari penyebab awal kejadian, probabilitas kegagalan lapisan proteksi, hingga dampak terhadap peralatan, bangunan, dan keselamatan personel. Selain itu, penelitian ini memberikan kontribusi praktis melalui identifikasi area kritis seperti isolatable section dengan potensi hydrocarbon release terbesar sehingga perusahaan dapat menetapkan strategi mitigasi yang lebih tepat sasaran.

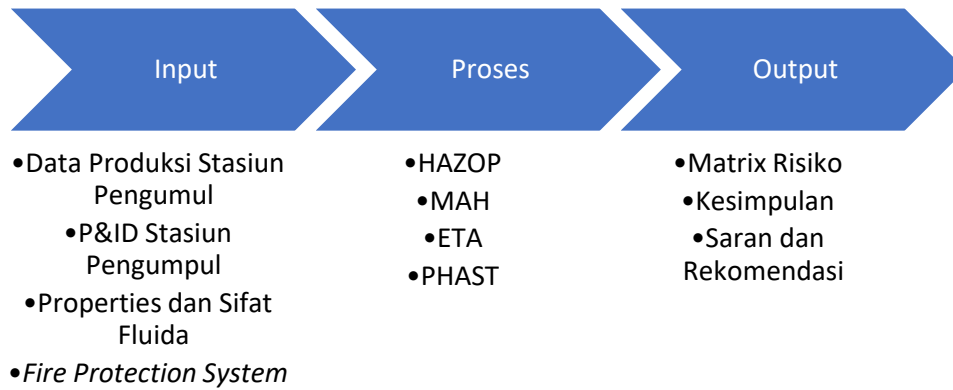
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi bahaya kebakaran dan ledakan akibat kegagalan operasional pada Stasiun Pengumpul Minyak PT XYZ, menentukan skenario kecelakaan dominan melalui analisis HAZOP dan ETA, serta mengevaluasi konsekuensi fisik menggunakan simulasi PHAST. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat teoritis berupa kontribusi terhadap pengembangan kajian keselamatan proses pada industri minyak dan gas, khususnya dalam penerapan metode analisis risiko terpadu pada fasilitas produksi hulu migas. Secara praktis, hasil penelitian dapat menjadi referensi bagi perusahaan dalam memperkuat sistem manajemen keselamatan proses, meningkatkan keandalan peralatan kritis, mengoptimalkan sistem proteksi kebakaran dan ledakan, serta menyusun strategi tanggap darurat yang lebih efektif. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu mendukung terciptanya operasi fasilitas migas yang lebih aman, andal, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Konsep Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain penelitian deskriptif-kualitatif dan kuantitatif yang bertujuan untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai potensi bahaya kebakaran dan ledakan pada Stasiun Pengumpul Minyak PT XYZ, sekaligus memberikan kuantifikasi risiko

yang dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan manajemen keselamatan proses. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menjelaskan fenomena yang ada di lapangan, khususnya terkait potensi deviasi proses yang dapat menimbulkan bahaya. Sementara itu, pendekatan kuantitatif dilakukan untuk menghitung probabilitas terjadinya skenario insiden serta besaran dampak yang ditimbulkan jika insiden tersebut benar-benar terjadi.



Gambar 1 Model Penelitian

Metode utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Hazard and Operability Study* (HAZOP), *Event Tree Analysis* (ETA), serta analisis konsekuensi dengan bantuan perangkat lunak PHAST (*Process Hazard Analysis Software Tool*). HAZOP dipilih karena merupakan salah satu metode paling sistematis dalam mengidentifikasi deviasi proses dari kondisi operasi normal. Dengan menggunakan kata panduan (*guide words*) pada parameter-parameter penting seperti tekanan, temperatur, aliran, dan level, HAZOP memungkinkan peneliti bersama tim ahli di lapangan untuk menemukan potensi penyebab insiden sejak tahap awal, sebelum berkembang menjadi kecelakaan besar. Hasil identifikasi HAZOP berupa daftar deviasi, penyebab, konsekuensi, serta safeguard yang ada akan menjadi dasar penentuan initiating event dalam analisis lebih lanjut.

Setelah hazard teridentifikasi, metode *Event Tree Analysis* (ETA) digunakan untuk menilai bagaimana suatu kejadian awal (*initiating event*) dapat berkembang ke arah konsekuensi yang lebih serius. ETA memungkinkan pemodelan jalur-jalur kejadian berdasarkan keberhasilan atau kegagalan lapisan proteksi yang tersedia, seperti detektor kebocoran, sistem *shutdown* darurat, katup pelepas tekanan (PSV), atau sistem pemadam kebakaran otomatis. Dengan memanfaatkan data probabilitas kegagalan dari basis data historis, baik internal PT XYZ maupun referensi industri seperti OREDA, ETA menghasilkan nilai kuantitatif berupa probabilitas terjadinya tiap skenario kecelakaan.

Langkah berikutnya adalah analisis konsekuensi dengan menggunakan perangkat lunak PHAST. *Software* ini dipilih karena telah banyak digunakan di industri minyak dan gas untuk memodelkan fenomena fisik akibat pelepasan hidrokarbon, termasuk dispersi gas, radiasi panas akibat kebakaran (*pool fire, jet fire*), serta gelombang tekanan akibat ledakan. Dengan PHAST, dampak kebakaran dan ledakan dapat digambarkan dalam bentuk radius paparan, intensitas panas, dan overpressure, yang kemudian dikaitkan dengan kriteria dampak pada manusia, peralatan, maupun lingkungan.

Desain penelitian ini tidak hanya menghasilkan daftar potensi bahaya, tetapi juga memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat risiko melalui kombinasi frekuensi kejadian (dari ETA) dan konsekuensi dari PHAST. Hasil akhir berupa peta risiko yang menunjukkan apakah suatu skenario termasuk dalam kategori dapat diterima, berada pada zona ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), atau tidak dapat diterima sehingga memerlukan langkah mitigasi tambahan.

Dengan konsep penelitian yang menggabungkan pendekatan identifikasi, kuantifikasi probabilitas, dan analisis konsekuensi ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata bagi penguatan sistem manajemen risiko di SP Mangunjaya PT XYZ, khususnya dalam mencegah dan mengendalikan potensi kebakaran dan ledakan yang tergolong sebagai *Major Accident Hazards* (MAH).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Konsekuensi Kebakaran dan Ledakan

Discharge: Release Rate, Release Duration and Release Inventory

Durasi dan *release rate* untuk setiap titik dihitung dengan PHAST. *Release rate* dalam *isolatable section* tergantung pada tekanan, ukuran lubang kebocoran dan *fase fluida* (*liquid*). Akibat dari kebocoran *liquid* akan bergantung pada tiga faktor terpenting yaitu *Release rate*; *Volume inventory*; dan *Operating pressure*.

Secara umum, semakin besar ukuran lubang, semakin besar laju *releasenya*. Jika penyalaan segera terjadi maka *spray fire* akan terbentuk. Besarnya api yang dihasilkan akan bergantung pada *release rate*.

Initial release rate adalah parameter kritis karena menentukan kemungkinan penyalaan dari *liquid release* atau ukuran api. Seiring waktu, *release rate* akan menurun dengan pengurangan yang sesuai dalam tingkat *liquid release* atau ukuran api. Pengurangan ukuran api seiring waktu ini penting dalam menilai apakah ada peralatan atau bangunan di sekitarnya yang kemungkinan besar akan gagal (eskalasi) karena paparan yang lebih lama. Nilai durasi *release* diperoleh dari PHAST.

Durasi terutama dinilai untuk mengevaluasi apakah kejadian kebakaran dapat memberikan kerusakan atau dampak yang signifikan pada fasilitas, khususnya pada *structure*. Nilai durasi *release* diperoleh dari PHAST. Hasil perhitungan durasi *release* disajikan pada Tabel 1 berikut. Hal ini menunjukkan bahwa beberapa *isolatable section* memberikan waktu *release* lebih dari 10 menit sehingga berpotensi terjadinya eskalasi ketika terjadi *Pool fire*.

Tabel 1 Release Rate dan Duration Calculation Result

ISO No.	Leak Size	Average Release Rate	Total Release Duration			
			Without Manual Valve Closing Time		With Manual Valve Closing Time	
			(sec)	(min)	(sec)	(min)
ISO_01L	5	338.194	>3600	> 60	>3600	> 60
	25	6930.38	>3600	> 60	>3600	> 60
	100	68935.9	596	10	2396	39.9
ISO_02V	5	13.6385	792	13.2	2592	43.2
	25	341.064	32	0.5	1832	30.5

ISO No.	Leak Size	Average Release Rate	Total Release Duration			
			Without Manual Valve Closing Time		With Manual Valve Closing Time	
			(sec)	(min)	(sec)	(min)
	76	3152.28	3	0.06	1803	30.1
ISO_03L	5	609.318	>3600	> 60	>3600	> 60
	25	3458.65	>3600	> 60	>3600	> 60
	100	32534.3	587.91	9.8	2388	39.8
	152	75166.8	254.472	4.2	2054	34.2
	5	401.263	>3600	> 60	>3600	> 60
ISO_04L	25	9957.04	>3600	> 60	>3600	> 60
	100	140681	>3600	> 60	>3600	> 60
	203	334067	3493.98	58.2	5294	88.2
	5	522.327	>3600	> 60	>3600	> 60
ISO_05L	25	12999.9	>3600	> 60	>3600	> 60
	100	193442	>3600	> 60	>3600	> 60
	152	399918	>3600	> 60	>3600	> 60
	5	522.327	>3600	> 60	>3600	> 60

Tabel 1 diatas menunjukkan hasil perhitungan karakteristik pelepasan hidrokarbon (*release characteristics*) untuk masing-masing *isolatable section* berdasarkan variasi ukuran kebocoran (*leak size*). Parameter utama yang dianalisis meliputi laju pelepasan rata-rata (*average release rate*) serta durasi pelepasan (*total release duration*) baik tanpa tindakan penutupan manual *valve* maupun dengan mempertimbangkan waktu penutupan manual *valve* oleh operator. Data ini sangat penting dalam analisis konsekuensi karena menentukan besarnya *inventory* hidrokarbon yang terlepas ke lingkungan dan mempengaruhi tingkat keparahan skenario seperti gas dispersion, *jet fire*, *flash fire*, *pool fire*, maupun *explosion*.

Secara umum, tabel menunjukkan hubungan yang sangat jelas bahwa semakin besar ukuran kebocoran, maka laju pelepasan hidrokarbon meningkat secara signifikan. Pada saat yang sama, durasi pelepasan cenderung menurun apabila *inventory* proses cepat habis akibat laju pelepasan yang sangat besar. Kondisi ini menggambarkan karakteristik dasar release pada sistem proses migas, yaitu kebocoran kecil menghasilkan pelepasan dengan laju relatif rendah namun berlangsung lama, sedangkan kebocoran besar atau *rupture* menghasilkan pelepasan sangat besar dalam waktu yang lebih singkat.

Pada ISO_01L, yaitu area yang didominasi *inventory* cairan hidrokarbon, kebocoran kecil hingga medium (5 mm dan 25 mm) menunjukkan durasi pelepasan lebih dari 3600 detik atau lebih dari 60 menit baik tanpa maupun dengan manual *valve closing*. Hal ini menunjukkan bahwa *inventory* pada *section* tersebut sangat besar dan tidak dapat segera terisolasi secara efektif. Kondisi seperti ini sangat kritis dari perspektif *pool fire* karena pelepasan hidrokarbon dapat berlangsung terus menerus dalam waktu lama sehingga meningkatkan potensi akumulasi tumpahan dan perluasan area kebakaran. Sementara itu, pada kebocoran 100 mm, laju pelepasan meningkat drastis hingga 68.935,9 kg/jam dengan durasi pelepasan sekitar 596 detik tanpa intervensi manual dan meningkat menjadi 2396 detik ketika mempertimbangkan manual *valve closing time*. Hasil ini menunjukkan bahwa keterlambatan isolasi manual dapat memperpanjang durasi *release* hampir empat kali lipat, sehingga volume hidrokarbon yang terlepas menjadi jauh lebih besar.

Pada ISO_02V yang merupakan sistem gas atau vapor, karakteristik pelepasannya berbeda dibanding section cairan. Laju pelepasan relatif lebih kecil, namun inventory gas habis jauh lebih cepat. Pada kebocoran 76 mm, *release rate* mencapai 3152,28 kg/jam tetapi *inventory* habis hanya dalam waktu sekitar 3 detik tanpa manual *isolation*. Hal ini menunjukkan bahwa pelepasan gas pada *pressure vessel* atau *gas line* cenderung bersifat cepat dan impulsif. Namun ketika mempertimbangkan manual *valve closing*, total durasi meningkat menjadi sekitar 1803 detik atau 30 menit. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sebagian besar *inventory* tambahan yang terlepas berasal dari aliran proses yang masih terus masuk sebelum sistem berhasil diisolasi. Dari perspektif *process safety*, kondisi ini sangat penting karena semakin lama gas release berlangsung maka peluang terbentuknya *vapor cloud* dan *ignition* juga meningkat.

ISO_03L menunjukkan salah satu kondisi paling kritis dalam tabel. Pada kebocoran 152 mm, laju pelepasan mencapai 75.166,8 kg/jam dengan durasi sekitar 254 detik tanpa manual *isolation* dan meningkat menjadi 2054 detik setelah mempertimbangkan waktu penutupan manual *valve*. Selain itu, untuk kebocoran kecil dan medium, *release duration* tetap berada di atas 60 menit. Kondisi ini menunjukkan bahwa section tersebut memiliki kombinasi antara *inventory* besar dan kemampuan isolasi yang belum optimal. Dari perspektif risiko kebakaran, kondisi seperti ini sangat berbahaya karena menghasilkan potensi *pool fire* berkepanjangan dengan thermal radiation yang dapat meningkatkan kemungkinan eskalasi ke *equipment* di sekitarnya.

Pada ISO_04L dan ISO_05L terlihat bahwa *release rate* meningkat sangat drastis pada ukuran kebocoran besar. Pada ISO_05L misalnya, kebocoran 152 mm menghasilkan *release rate* sebesar 399.918 kg/jam dengan durasi pelepasan lebih dari 60 menit. Ini merupakan nilai tertinggi dalam tabel dan menunjukkan bahwa section tersebut memiliki *inventory* cairan hidrokarbon yang sangat besar tanpa kemampuan isolasi cepat yang memadai. Kondisi seperti ini sangat kritis karena apabila *ignition* terjadi maka potensi kebakaran besar (*large pool fire*) menjadi sangat tinggi. Selain itu, durasi pelepasan yang sangat lama juga meningkatkan kemungkinan terjadinya eskalasi kebakaran, kerusakan domino terhadap *equipment* lain, serta kesulitan pengendalian oleh tim tanggap darurat.

Perbandingan antara kondisi “*without manual valve closing time*” dan “*with manual valve closing time*” juga memberikan informasi yang sangat penting terkait efektivitas *emergency response* dan kemampuan isolasi proses. Pada hampir seluruh skenario, durasi pelepasan meningkat secara signifikan ketika mempertimbangkan waktu penutupan manual *valve*. Hal ini menunjukkan bahwa respon operator memiliki pengaruh langsung terhadap total *inventory* yang terlepas. Semakin lambat operator melakukan isolasi, maka semakin besar massa hidrokarbon yang keluar dan semakin berat konsekuensi yang dapat terjadi. Dengan kata lain, kecepatan deteksi, komunikasi darurat, akses menuju *valve* isolasi, serta kemampuan operator melakukan *shutdown* menjadi faktor kritikal dalam pengendalian risiko.

Hasil tabel ini juga menunjukkan pentingnya penerapan sistem isolasi otomatis seperti *Emergency Shutdown System (ESD)*, *remote operated valve*, maupun *automatic shutdown logic*. Pada beberapa skenario dengan *release rate* tinggi, ketergantungan pada manual *valve closing* dapat menyebabkan durasi pelepasan tetap sangat panjang sehingga mitigasi berbasis respon manusia menjadi kurang efektif. Oleh karena itu, fasilitas dengan *inventory* besar dan

potensi *release* tinggi sebaiknya memiliki sistem isolasi otomatis untuk mempercepat penghentian aliran hidrokarbon saat terjadi kebocoran.

Secara keseluruhan, tabel tersebut menunjukkan bahwa risiko terbesar pada fasilitas tidak hanya dipengaruhi oleh probabilitas kebocoran, tetapi juga oleh besarnya *release rate* dan lamanya durasi pelepasan. *Section* dengan *inventory* besar dan waktu isolasi lama memiliki potensi menghasilkan konsekuensi yang jauh lebih berat walaupun frekuensi kejadiannya mungkin lebih kecil. Oleh karena itu, strategi pengendalian risiko perlu difokuskan pada peningkatan kemampuan deteksi dini, percepatan isolasi proses, pengurangan *inventory release*, peningkatan *reliability valve* isolasi, serta kesiapan *emergency response* untuk meminimalkan dampak pelepasan hidrokarbon ketika kejadian terjadi.

Konsekuensi dan Frekuensi Kerusakan Terhadap Peralatan/Gedung

Tabel 2 Hasil Kriteria Peralatan/Gedung Pada Plan

No	Peralatan / Gedung	ISO 1_L (Test Tank)		ISO 2_V (Scrubber - LP Test Separator - MJY-V-004)		ISO 3_L (Sand Filter - MJY-V001 and 3 Phase LP Separator - MJY-V-003)		ISO 4_L Prod. Tank - MJY-T003		ISO 5_L Wash Tank - MJY-T002 & Prod. Tank - MJY-T001)	
		K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2
1	Fire Water Pump (MJYP-001)	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	N
2	Office	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	N
3	Warehouse	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
4	Security Post (Area Tenggara)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
5	Security Post (Area Barat Laut)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
6	Rumah (sebelah barat)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7	Rumah (sebelah utara)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8	Rumah (sebelah selatan)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9	Vent header	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10	New FW pump & Diesel Tank	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Berdasarkan hasil analisis konsekuensi dan evaluasi frekuensi kejadian pada Tabel 13.1, secara umum dapat disimpulkan bahwa seluruh fasilitas vital maupun bangunan dengan okupansi personel tidak mengalami paparan bahaya kebakaran pada tingkat yang melebihi

kriteria risiko yang ditetapkan. Hal ini ditunjukkan oleh hasil evaluasi bahwa sebagian besar fasilitas memiliki status “N” pada seluruh skenario konsekuensi kebakaran, baik pada kategori K1 maupun K2. Selain itu, nilai frekuensi kerusakan (*damage frequency*) seluruh fasilitas juga berada di bawah batas toleransi (1×10^{-4}) *events/year* sebagaimana direkomendasikan dalam NORSOK Z-013. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa dari sisi desain tata letak (*layout safety*), pemisahan antar fasilitas proses dan area pendukung telah mampu mengurangi potensi eskalasi akibat thermal radiation maupun dampak kebakaran.

Walaupun demikian, hasil analisis menunjukkan bahwa *Fire Water Pump* (MJY-P-001) dan *Office* berada dalam area konsekuensi dari ISO 3_L yang terdiri dari *Sand Filter* dan 3 *Phase LP Separator*. *Node ISO 3_L* sebelumnya telah diidentifikasi sebagai area dengan frekuensi *liquid pool* tertinggi pada fasilitas, khususnya untuk skenario kebocoran kecil (*small leak*) sebesar (2.27×10^{-2}) per tahun. Selain itu, area ini juga memiliki frekuensi *pool fire* yang relatif lebih tinggi dibandingkan node lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa walaupun risiko eskalasi masih berada di bawah kriteria penerimaan risiko, area ISO 3_L tetap menjadi salah satu skenario paling kritis dalam perencanaan kesiapsiagaan tanggap darurat (*emergency response readiness*). Walaupun nilai risiko masih berada di bawah kriteria penerimaan, keberadaan *Office* dan *Fire Water Pump* di dalam area konsekuensi ISO 3_L perlu menjadi perhatian khusus. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan terganggunya proses evakuasi personel serta menurunkan efektivitas fungsi *emergency response* ketika terjadi *pool fire*. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian lebih lanjut terkait relokasi *Office* dan *Fire Water Pump* atau penerapan *additional protection* measures untuk memastikan keselamatan personel dan keberlangsungan fungsi *firefighting system* selama kondisi darurat.

Emergency Response

Dari perspektif *emergency response readiness*, keberadaan *Fire Water Pump* di dalam area konsekuensi memiliki implikasi yang sangat penting terhadap kemampuan fasilitas dalam merespon kejadian kebakaran. *Fire Water Pump* merupakan bagian utama dari sistem proteksi aktif yang berfungsi menyediakan suplai air pemadam ke *hydrant*, monitor, maupun foam system saat terjadi kebakaran. Apabila area sekitar pompa mengalami paparan thermal radiation atau terhalang oleh asap dan api, maka terdapat potensi keterlambatan aktivasi sistem pemadaman maupun kegagalan akses operator menuju fasilitas tersebut. Oleh karena itu, walaupun analisis menunjukkan bahwa tingkat radiasi panas belum mencapai nilai eskalasi 37.5 kW/m^2 , kesiapan operasional *Fire Water Pump* tetap harus dipastikan melalui pengujian berkala, inspeksi performa pompa, verifikasi kapasitas tekanan *firewater ring main*, serta simulasi pengoperasian saat kondisi darurat.

Selain kesiapan teknis peralatan pemadam, aspek aksesibilitas dan mobilisasi tim tanggap darurat juga menjadi faktor yang sangat penting. Area ISO 3_L yang memiliki potensi *spill* dan *pool fire* dapat menghasilkan asap tebal, panas radiasi, serta hambatan visual yang mempengaruhi kecepatan respon personel *emergency response team*. Oleh karena itu, jalur akses menuju *Fire Water Pump*, *hydrant*, *foam chamber*, maupun area isolasi darurat harus dipastikan tetap aman digunakan selama skenario kebakaran berlangsung. Evaluasi terhadap jalur evakuasi dan jalur mobilisasi pemadam perlu mempertimbangkan arah penyebaran api, kemungkinan genangan hidrokarbon, serta potensi penyebaran panas radiasi agar tim tanggap darurat tetap dapat melakukan intervensi tanpa memasuki area dengan tingkat paparan yang membahayakan.

Keberadaan *Office* di dalam area konsekuensi juga menunjukkan perlunya penguatan perlindungan terhadap personel non-proses. Walaupun probabilitas dampak langsung terhadap bangunan *Office* masih rendah, keberadaan personel administrasi maupun pekerja pendukung di area tersebut tetap berpotensi terdampak oleh kepanikan, asap, maupun paparan panas apabila terjadi kebakaran besar. Oleh karena itu, *emergency response readiness* tidak hanya berfokus pada kemampuan pemadaman kebakaran, tetapi juga pada efektivitas sistem perlindungan personel. Hal ini mencakup kesiapan alarm darurat, sistem komunikasi *emergency*, prosedur evakuasi, *muster point* yang aman, serta pelaksanaan simulasi evakuasi secara berkala untuk memastikan seluruh personel memahami tindakan yang harus dilakukan saat alarm kebakaran aktif.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa sebagian besar skenario dominan pada fasilitas berupa *liquid pool* dan *pool fire* akibat kebocoran kecil. Karakteristik skenario seperti ini menuntut kemampuan respon awal (*initial response*) yang cepat dan efektif karena keberhasilan pengendalian pada fase awal sangat menentukan apakah kejadian dapat dikendalikan sebelum berkembang menjadi kebakaran besar. Oleh karena itu, kesiapan operator lapangan dalam melakukan identifikasi *release*, isolasi area, penghentian sumber aliran, serta aktivasi *emergency shutdown system* menjadi sangat penting. Ketersediaan *portable firefighting equipment* seperti APAR, *foam trolley*, *fire hose*, dan *fire monitor* juga perlu dipastikan selalu dalam kondisi siap pakai dan mudah diakses dari area proses.

Selain respon internal, *emergency response readiness* juga perlu mempertimbangkan kemampuan koordinasi eksternal apabila terjadi eskalasi kejadian. Mengingat terdapat area permukiman di sekitar fasilitas walaupun tidak berada dalam zona dampak langsung, maka sistem komunikasi dengan pihak eksternal seperti *security*, fasilitas kesehatan, pemadam kebakaran eksternal, dan pemerintah setempat tetap perlu dipersiapkan. Hal ini penting untuk memastikan bahwa apabila terjadi pelepasan hidrokarbon besar atau kebakaran yang berkembang di luar kapasitas respon internal, proses eskalasi bantuan dapat dilakukan dengan cepat dan terkoordinasi.

Dari sisi *process safety management*, hasil analisis ini menunjukkan bahwa kesiapsiagaan tanggap darurat tidak dapat hanya didasarkan pada rendahnya nilai frekuensi kejadian atau tidak tercapainya kriteria *thermal escalation*. Meskipun probabilitas kejadian relatif kecil, konsekuensi kebakaran hidrokarbon tetap memiliki potensi dampak besar terhadap keselamatan personel, kontinuitas operasi, dan kerusakan aset apabila respon awal tidak berjalan efektif. Oleh karena itu, *emergency response readiness* harus dipandang sebagai lapisan proteksi terakhir (*last layer of protection*) yang berfungsi membatasi dampak ketika seluruh lapisan pencegahan sebelumnya gagal bekerja.

Apabila terjadi kebocoran hidrokarbon yang berkembang menjadi *pool fire* pada area ISO 3_L, maka langkah tanggap darurat harus dilakukan secara cepat, terstruktur, dan terkoordinasi untuk mencegah eskalasi kejadian serta melindungi personel maupun masyarakat sekitar. Mengingat area tersebut memiliki potensi dampak terhadap *Office* dan *Fire Water Pump*, maka respon awal (*initial response*) menjadi sangat kritis dalam menentukan keberhasilan pengendalian keadaan darurat.

Ketika alarm kebakaran atau deteksi gas aktif, operator lapangan harus segera melakukan identifikasi sumber *release* dan menginformasikan kondisi darurat kepada control point atau supervisor operasi. Pada saat yang sama, operator wajib mengaktifkan *Emergency*

Shutdown System (ESD) untuk menghentikan aliran hidrokarbon menuju area yang mengalami kebocoran. Apabila *automatic shutdown* tidak bekerja, operator yang telah ditunjuk dalam prosedur tanggap darurat harus segera melakukan isolasi manual menggunakan *valve* terdekat dengan tetap memperhatikan keselamatan personel dan arah penyebaran api.

Setelah alarm darurat aktif, seluruh personel non-esensial di area proses dan *Office* harus segera melakukan evakuasi menuju muster point melalui jalur evakuasi yang telah ditentukan. Evakuasi harus dilakukan menjauhi arah angin (*crosswind/upwind evacuation*) untuk menghindari paparan asap, HC *vapor*, maupun *thermal radiation*. Personel tidak diperbolehkan melakukan pengambilan barang pribadi atau kembali ke area kerja setelah alarm darurat dibunyikan. Tim leader atau area coordinator harus melakukan head count di *muster point* untuk memastikan tidak ada personel yang tertinggal di area terdampak.

Apabila *pool fire* telah terjadi, *emergency response team* (ERT) harus segera melakukan pengamanan area dengan menetapkan exclusion zone sesuai radius *thermal radiation*. Tim pemadam kemudian melakukan pendinginan (*cooling*) terhadap *equipment* di sekitar sumber kebakaran menggunakan hydrant, monitor, atau *water spray* untuk mencegah eskalasi dan domino effect ke peralatan lain. *Foam system* atau *foam* monitor digunakan untuk mengendalikan dan memadamkan kebakaran hidrokarbon cair apabila kondisi memungkinkan dan sumber release telah berhasil diisolasi.

Karena *Fire Water Pump* berada di dalam area konsekuensi, maka operator firewater system harus segera memastikan pompa dapat dioperasikan sebelum akses menuju area tertutup oleh api, asap, atau *thermal radiation*. Apabila akses utama terhalang, *emergency response team* harus menggunakan jalur alternatif yang telah ditetapkan dalam *emergency response plan*. Jika kondisi area sudah tidak aman untuk dimasuki, maka pengoperasian *firewater system* dilakukan melalui *remote operation* atau *backup firefighting equipment* apabila tersedia.

Selain penanganan di area proses, personel di *Office* harus segera melakukan sheltering sementara atau evakuasi penuh tergantung tingkat kedaruratan yang diinformasikan oleh *incident commander*. Jika *thermal radiation* atau asap mulai mempengaruhi area *Office*, seluruh personel harus segera meninggalkan bangunan dan menuju muster point yang berada di luar area konsekuensi. Sistem komunikasi darurat seperti radio, *alarm*, dan *public announcement* harus tetap aktif untuk memberikan instruksi selama proses evakuasi berlangsung.

Apabila *release* hidrokarbon berpotensi berdampak keluar area fasilitas, perusahaan harus segera menghubungi pihak eksternal seperti pemadam kebakaran daerah, fasilitas kesehatan, aparat keamanan, dan pemerintah setempat. *Security* melakukan pembatasan akses menuju fasilitas untuk mencegah masuknya personel yang tidak berkepentingan ke area berbahaya. Selain itu, masyarakat sekitar perlu diinformasikan untuk menjauhi area fasilitas, menghentikan aktivitas yang berpotensi menjadi sumber *ignition*, serta melakukan evakuasi apabila diperlukan berdasarkan arahan *emergency coordinator*.

Selama kondisi darurat berlangsung, *incident commander* bertanggung jawab melakukan koordinasi seluruh aktivitas tanggap darurat, termasuk evaluasi perkembangan kebakaran, status isolasi proses, kondisi personel, dan potensi eskalasi ke fasilitas lain. Apabila *thermal radiation* meningkat atau kebakaran tidak dapat dikendalikan oleh tim internal, maka prioritas utama dialihkan pada perlindungan personel dan pengendalian area agar kejadian tidak berkembang menjadi kecelakaan mayor yang lebih luas.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa fasilitas memiliki tingkat risiko kebakaran yang masih dapat diterima, namun area ISO 3_L tetap menjadi fokus utama dalam penguatan *emergency preparedness* karena memiliki frekuensi *release* tertinggi serta potensi *pool fire* terbesar. Oleh sebab itu, peningkatan kesiapan tanggap darurat perlu difokuskan pada penguatan *firewater system*, *reliability firefighting equipment*, *aksesibilitas emergency response*, kesiapan personel, efektivitas komunikasi darurat, serta pelaksanaan *fire drill* dan simulasi skenario *pool fire* secara berkala untuk memastikan seluruh sistem proteksi dan personel mampu merespon kejadian secara cepat, aman, dan efektif.

Analisis Hazard SP Mangunjaya

Berdasarkan keseluruhan hasil identifikasi bahaya, analisis frekuensi kebocoran, *Event Tree Analysis* (ETA), serta analisis konsekuensi menggunakan PHAST, dapat disimpulkan bahwa bahaya utama (*major hazards*) pada fasilitas stasiun pengumpul minyak didominasi oleh potensi pelepasan hidrokarbon (*hydrocarbon release*) yang dapat berkembang menjadi *gas dispersion*, *pool fire*, *jet fire*, maupun *flash fire*. Sumber bahaya utama berasal dari peralatan proses yang memiliki inventory hidrokarbon besar dan beroperasi pada tekanan maupun laju alir yang cukup tinggi, terutama pada area separator, *scrubber*, *production tank*, *wash tank*, *sand filter*, *flowline*, serta *loading system*.

Hasil HAZOP menunjukkan bahwa sebagian besar skenario bahaya dipicu oleh deviasi proses seperti tekanan tinggi (*high pressure*), level tinggi (*high level*), kegagalan kontrol aliran, korosi, kegagalan instrumentasi, serta kegagalan isolasi sistem. Deviasi tersebut berpotensi menyebabkan kehilangan *containment* yang menjadi initiating event utama dalam analisis risiko. Selain faktor teknis, aspek operasional seperti keterlambatan shutdown, ketergantungan terhadap manual intervention, dan belum optimalnya implementasi prosedur operasi juga menjadi faktor yang meningkatkan kemungkinan eskalasi kejadian.

Dari seluruh *isolatable* yang dianalisis, ISO 3_L yang meliputi *Sand Filter* dan 3 Phase LP Separator teridentifikasi sebagai salah satu area paling kritis. Area ini memiliki frekuensi *liquid spill* dan *pool fire* tertinggi dibandingkan *isolatable* lainnya. Analisis dispersi gas menunjukkan bahwa kebocoran besar pada *isolatable* ini mampu menghasilkan radius dispersi hingga ratusan meter pada konsentrasi rendah LFL, yang menunjukkan potensi terbentuknya awan gas mudah terbakar dalam skala besar. Selain itu, hasil *thermal radiation* menunjukkan bahwa skenario *pool fire* maupun *jet fire* dapat menghasilkan radiasi panas yang mencapai area fasilitas penting di sekitarnya.

Analisis ETA menunjukkan bahwa efektivitas lapisan proteksi seperti *fire & gas detector*, *emergency shutdown system (ESD)*, *pressure safety valve (PSV)*, dan kemampuan isolasi proses sangat menentukan perkembangan skenario kecelakaan. Kegagalan sistem deteksi maupun keterlambatan isolasi dapat memperpanjang durasi pelepasan hidrokarbon sehingga meningkatkan kemungkinan *ignition* dan memperbesar konsekuensi kejadian. Dalam beberapa skenario, durasi *release* meningkat signifikan ketika mempertimbangkan manual *valve closing time*, yang menunjukkan pentingnya *automatic isolation system* untuk mengurangi *inventory release*.

Dari sisi konsekuensi terhadap manusia dan fasilitas, *thermal radiation* pada level 4,73 kW/m² hingga 12,5 kW/m² menunjukkan adanya potensi gangguan evakuasi, cedera serius, hingga fatality apabila personel terpapar dalam waktu tertentu. Walaupun sebagian besar skenario masih berada di bawah *acceptance criteria*, hasil analisis menunjukkan bahwa

beberapa fasilitas penting seperti *Office* dan *Fire Water Pump* berada dalam area konsekuensi ISO 3_L. Kondisi ini menjadi perhatian serius karena dapat mengganggu proses evakuasi personel dan menurunkan efektivitas *emergency response* saat kebakaran terjadi.

Selain risiko terhadap fasilitas internal, keberadaan rumah warga di sekitar area operasi juga perlu diperhatikan. Walaupun hasil analisis menunjukkan area permukiman belum berada pada zona fatality utama, potensi dampak tidak langsung seperti paparan asap, *HC vapor*, *thermal radiation* rendah, maupun gangguan proses evakuasi tetap perlu dipertimbangkan dalam *emergency preparedness*. Oleh karena itu, aspek *offsite emergency response* dan pengendalian pengembangan permukiman di sekitar fasilitas menjadi bagian penting dalam pengelolaan risiko secara menyeluruh.

Secara keseluruhan, hazard utama pada fasilitas ini dapat dikategorikan menjadi:

1. kehilangan containment hidrokarbon,
2. kebakaran cairan (*pool fire*),
3. kebakaran semburan gas (*jet fire*),
4. dispersi gas mudah terbakar,
5. dan potensi ledakan akibat *delayed ignition*.

Hazard tersebut dipengaruhi oleh kombinasi faktor teknis, operasional, integritas peralatan, efektivitas sistem proteksi, serta kesiapsiagaan tanggap darurat. Oleh karena itu, strategi pengendalian risiko perlu difokuskan pada peningkatan integritas fasilitas, optimalisasi sistem deteksi dan isolasi otomatis, peningkatan *reliability firefighting system*, penguatan *emergency response readiness*, pengendalian ignition source, serta evaluasi tata letak fasilitas untuk meminimalkan potensi eskalasi dan dampak terhadap personel maupun lingkungan sekitar.

Implikasi Manajerial

Hasil analisis HAZOP, penentuan risiko terbesar, *Event Tree Analysis* (ETA), serta *consequence modeling* menggunakan PHAST memberikan implikasi manajerial yang sangat luas terhadap pengelolaan keselamatan proses (*process safety management*) pada fasilitas produksi migas. Keseluruhan hasil studi menunjukkan bahwa risiko utama pada fasilitas didominasi oleh potensi kehilangan containment hidrokarbon (*loss of containment*) yang dapat berkembang menjadi *gas dispersion*, *pool fire*, *jet fire*, dan *flash fire*. Risiko tersebut tidak hanya berdampak pada keselamatan personel dan kerusakan aset, tetapi juga berpotensi mengganggu kontinuitas operasi, reputasi perusahaan, hingga keberlangsungan bisnis secara keseluruhan.

Dari hasil HAZOP diketahui bahwa sebagian besar skenario bahaya dipicu oleh deviasi proses seperti *high pressure*, *high level*, *low pressure*, kegagalan venting system, *malfunction control valve*, korosi dan erosi, serta kegagalan instrumentasi dan *shutdown system*. Pola deviasi yang berulang pada berbagai node menunjukkan bahwa tantangan utama fasilitas bukan hanya terletak pada satu peralatan tertentu, tetapi pada bagaimana perusahaan mengelola integritas sistem proses secara menyeluruh. Hal ini memberikan implikasi bahwa pendekatan keselamatan tidak dapat lagi hanya bersifat reaktif atau berbasis perbaikan setelah kerusakan terjadi, melainkan harus diarahkan pada pendekatan preventif berbasis risiko (*risk-based management*).

Dalam konteks manajerial, kondisi tersebut menuntut perusahaan untuk memperkuat implementasi *asset integrity management*. Peralatan seperti separator, *scrubber*, *sand filter*,

wash tank, dan *production tank* yang teridentifikasi memiliki risiko catastrophic harus diperlakukan sebagai *safety critical equipment* yang memerlukan pengawasan lebih ketat dibanding peralatan lainnya. Program inspeksi ketebalan pipa dan vessel (*wall thickness monitoring*), *corrosion monitoring*, *preventive maintenance*, *predictive maintenance*, hingga analisis *remaining life equipment* harus menjadi bagian dari strategi bisnis operasional, bukan sekadar aktivitas *maintenance* rutin. Manajemen perlu memastikan bahwa alokasi anggaran untuk inspeksi integritas dan *reliability* tidak dipandang sebagai biaya tambahan, tetapi sebagai investasi untuk mencegah kerugian akibat kecelakaan *major*.

Selain aspek integritas mekanik, hasil ETA menunjukkan bahwa efektivitas lapisan proteksi (*layers of protection*) sangat menentukan perkembangan skenario kecelakaan. Kegagalan *fire & gas detector*, keterlambatan *emergency shutdown* (ESD), atau kegagalan isolasi proses terbukti meningkatkan durasi pelepasan hidrokarbon secara signifikan sehingga memperbesar peluang ignition dan eskalasi kejadian. Implikasi manajerial dari kondisi ini adalah perlunya peningkatan fokus terhadap *reliability* dan *availability* sistem proteksi aktif. Dalam banyak kasus kecelakaan migas besar, kegagalan bukan hanya berasal dari kebocoran awal, tetapi dari ketidakmampuan sistem proteksi untuk menghentikan perkembangan kejadian pada fase awal.

Oleh karena itu, manajemen perlu memastikan bahwa seluruh *safety critical elements* memiliki:

1. jadwal inspeksi dan *proof test* yang jelas,
2. target *reliability*,
3. *performance standard*,
4. serta mekanisme audit berkala.

Perusahaan juga perlu membangun budaya bahwa alarm, *detector*, dan *shutdown system* bukan sekadar alat pendukung operasi, tetapi merupakan lapisan proteksi utama yang menentukan keselamatan fasilitas. Kegagalan kecil pada instrumentasi yang diabaikan dapat berkembang menjadi major accident apabila tidak segera ditangani.

Hasil *consequence modeling* menggunakan PHAST memperlihatkan bahwa beberapa skenario kebocoran menghasilkan radius dispersi gas dan *thermal radiation* yang cukup besar. Area ISO 3_L yang meliputi Sand Filter dan 3 Phase LP Separator teridentifikasi sebagai salah satu peralatan paling kritis karena memiliki frekuensi *liquid pool* dan *pool fire* tertinggi. *Radius thermal radiation* pada beberapa skenario bahkan mencapai area fasilitas penting seperti *Office* dan *Fire Water Pump*. Kondisi ini memiliki implikasi besar terhadap kebijakan *facility siting* dan *emergency response management*.

Dari perspektif manajerial, hasil tersebut menunjukkan bahwa tata letak fasilitas eksisting perlu dievaluasi bukan hanya berdasarkan efisiensi operasional, tetapi juga berdasarkan kemampuan fasilitas untuk bertahan saat terjadi keadaan darurat. Keberadaan *Office* di dalam area konsekuensi menunjukkan bahwa personel administrasi maupun non-proses masih memiliki potensi terdampak ketika terjadi kebakaran besar. Sementara itu, keberadaan *Fire Water Pump* di dalam area konsekuensi menunjukkan adanya risiko hilangnya kemampuan pemadaman pada saat sistem tersebut justru paling dibutuhkan. Kondisi ini menuntut manajemen untuk melakukan evaluasi strategis terkait:

1. relokasi fasilitas penting,
2. penyediaan *redundancy system*,

3. penguatan *passive fire protection*,
4. serta pengembangan *protected access route* bagi *emergency response team*.

Dalam perspektif *process safety*, kemampuan fasilitas untuk mempertahankan fungsi proteksi saat kondisi darurat sama pentingnya dengan kemampuan mencegah terjadinya release itu sendiri.

Hasil analisis juga memberikan implikasi penting terhadap pengelolaan sumber daya manusia dan budaya keselamatan (*safety culture*). Sebagian besar skenario kecelakaan menunjukkan bahwa respon awal operator sangat menentukan apakah kejadian dapat dikendalikan sebelum berkembang menjadi eskalasi besar. Keterlambatan identifikasi release, keterlambatan shutdown, atau kesalahan pengambilan keputusan saat kondisi abnormal dapat meningkatkan konsekuensi kejadian secara signifikan.

Oleh karena itu, perusahaan perlu memastikan bahwa seluruh personel tidak hanya memahami prosedur operasi normal, tetapi juga memiliki kompetensi dalam:

1. mengenali tanda awal *upset condition*,
2. melakukan *emergency isolation*,
3. mengoperasikan *firefighting equipment*,
4. dan melakukan evakuasi secara cepat dan tepat.

Pelatihan tanggap darurat tidak boleh hanya bersifat administratif untuk memenuhi persyaratan audit, tetapi harus dirancang berbasis skenario nyata sesuai hasil HAZOP dan *consequence analysis* yang telah dilakukan. Simulasi *pool fire*, gas release, delayed ignition, hingga kehilangan fungsi *firewater system* perlu dilakukan secara berkala agar personel memiliki kesiapan psikologis dan teknis ketika kondisi darurat benar-benar terjadi.

Selain implikasi internal, hasil analisis juga menunjukkan bahwa perusahaan memiliki tanggung jawab terhadap perlindungan masyarakat sekitar (*community safety*). Walaupun rumah warga belum berada pada area *fatality* utama, beberapa skenario dispersi gas menunjukkan bahwa HC vapor masih berpotensi menyebar ke luar area fasilitas tergantung kondisi angin dan arah dispersi. Hal ini memberikan implikasi bahwa pengelolaan risiko tidak dapat berhenti di pagar fasilitas (*inside battery limit*), tetapi harus diperluas hingga mencakup *offsite emergency preparedness*.

Perusahaan perlu membangun komunikasi yang lebih aktif dengan masyarakat dan pemerintah daerah melalui:

1. sosialisasi potensi bahaya,
2. sistem peringatan dini,
3. jalur evakuasi warga,
4. simulasi tanggap darurat bersama,
5. serta koordinasi dengan fasilitas kesehatan dan pemadam kebakaran eksternal.

Selain itu, perusahaan juga perlu terlibat dalam pengendalian tata guna lahan (*land use planning*) untuk mencegah perkembangan permukiman yang semakin mendekati area proses. Dalam industri migas modern, keberhasilan *process safety* tidak hanya diukur dari rendahnya angka kecelakaan internal, tetapi juga dari kemampuan perusahaan melindungi masyarakat dan lingkungan sekitar dari dampak kecelakaan mayor.

Secara strategis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *process safety* harus ditempatkan sebagai bagian dari pengambilan keputusan manajerial tingkat tinggi (*top management commitment*). Risiko *catastrophic* yang teridentifikasi tidak dapat dikendalikan

hanya melalui tindakan operasional di lapangan, tetapi memerlukan dukungan kebijakan perusahaan, alokasi sumber daya, penguatan budaya keselamatan, serta pengawasan manajemen secara konsisten. Keputusan terkait *maintenance, reliability, manpower, training*, hingga investasi fasilitas proteksi memiliki hubungan langsung terhadap tingkat risiko kecelakaan *mayor* pada fasilitas.

Dengan demikian, implikasi manajerial utama dari hasil penelitian ini adalah perlunya transformasi pengelolaan keselamatan dari pendekatan yang bersifat *compliance-based* menjadi *risk-based process safety management* yang terintegrasi. Pendekatan ini menempatkan keselamatan proses sebagai bagian inti dari keberlangsungan operasi perusahaan sehingga pengendalian risiko tidak hanya bertujuan memenuhi standar, tetapi juga menjaga keselamatan manusia, kontinuitas produksi, perlindungan aset, serta keberlanjutan bisnis perusahaan dalam jangka panjang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa fasilitas SP Mangun Jaya memiliki tingkat risiko proses yang signifikan terutama pada skenario kehilangan containment hidrokarbon di peralatan utama seperti Sand Filter, Separator, Scrubber, Production Tank, Wash Tank, dan Test Tank. Risiko tersebut umumnya dipicu oleh deviasi operasi seperti tekanan tinggi, level berlebih, kegagalan sistem venting, korosi atau erosi, serta kegagalan instrumentasi dan control valve, dengan seluruh skenario dominan berada pada kategori risiko tidak dapat diterima (*unacceptable*) dan berkonsekuensi *catastrophic* yang berpotensi menimbulkan kebakaran, ledakan, gangguan operasional, kerusakan fasilitas, serta ancaman terhadap keselamatan personel dan lingkungan. Hasil analisis Event Tree Analysis (ETA) menunjukkan bahwa skenario dominan berupa liquid pool dan gas dispersion pada berbagai isolatable section, di mana ISO 3_L dan ISO 4_L menjadi area dengan tingkat konsekuensi paling signifikan akibat tingginya inventori hidrokarbon cair yang meningkatkan potensi pool fire, sedangkan ISO 2_V menunjukkan potensi bahaya terbesar pada sistem gas yang dapat berkembang menjadi jet fire maupun explosion. Selanjutnya, hasil analisis konsekuensi menggunakan PHAST mengonfirmasi bahwa skenario utama didominasi oleh gas dispersion dan pool fire, dengan peningkatan laju dan durasi pelepasan seiring bertambahnya ukuran kebocoran, khususnya pada ISO_03L, ISO_04L, dan ISO_05L. Skenario full bore release pada ISO_03L menjadi kondisi paling kritis dengan potensi radiasi termal mencapai area luas yang dapat mengganggu jalur evakuasi serta respons darurat, meskipun tidak terjadi thermal escalation pada peralatan utama karena tingkat radiasi ekstrem tidak tercapai. Selain itu, terdapat potensi dampak terhadap area permukiman di sekitar fasilitas, namun secara umum tingkat risiko masih berada dalam batas ALARP berdasarkan standar NORSOK Z-013. Secara keseluruhan, ISO_03L ditetapkan sebagai area paling kritis yang memerlukan prioritas pengendalian risiko dan penguatan sistem proteksi serta kesiapsiagaan tanggap darurat guna meminimalkan dampak terhadap manusia, aset, dan lingkungan.

REFERENSI

- Bouasla, A., Zennir, A., & Mechhoud, A. (2020). Risk analysis using HAZOP–fault tree–event tree methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 66, 104211.
- Center for Chemical Process Safety. (2010). *Guidelines for initiating events and independent protection layers*. American Institute of Chemical Engineers.
- Chen, L., Zhang, Y., Li, X., & Zhang, H. (2022). Research on quantitative calculation method of accident scope of oil-field gathering and transportation stations. *Journal of Hazardous Materials*, 426, 128–137.
- Dormohammadi, R., Moshiri, B., & Abbasi, F. (2015). Risk analysis by QRA on LPG cylinder filling installation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 97–107.
- Ericson, C. A. (2015). *Hazard analysis techniques for system safety*. Wiley.
- Fabbrocino, G., Costantino, D., & Greco, M. (2012). Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(1), 93–103.
- Habibi Jazin, A., Mousavi, S., & Zarei, S. (2019). Quantitative risk assessment of domino effect in fuel storage tank farm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 59, 99–110.
- Hu. (2017). Quantitative risk analysis of LPG tank explosion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 46, 18–28.
- ICChemE. (2017). Integrated approach: HAZOP → PHAST → SIL/LOPA. *Proceedings of the IChemE Conference*. ICChemE.
- International Association of Oil & Gas Producers. (2025). *Safety Performance Indicators – Process Safety Events – 2024 Data*. IOGP.
- Isarinia, M., Keshvari, R., & Karimi, N. (2020). PHAST modeling and HAZOP risk assessment for NTO tank in bipropellant stand. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 67, 104216.
- Khan & Abbasi. (2001). Explosion and fire incidents in petroleum refineries and oil storage depots: A historical survey. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14(6), 493–506.
- Kletz, T. A. (2009). *What went wrong? Case histories of process plant disasters and how they could have been avoided*. Gulf Professional Publishing.
- Li, Z., Zhang, D., & Zhou, J. (2018). Quantitative risk assessment of LNG bunkering stations using PHAST software. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55, 146–154.
- Mannan. (2012). *Lees' loss prevention in the process industries*. Butterworth-Heinemann.
- OREDA. (2009). *Offshore reliability data handbook*. Det Norske Veritas.
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Taylor & Francis.
- Saura, G., Dela Cruz, M. A., & Mendoza, F. (2015). Case studies on the application of HAZOP methodology for loss of primary containment in tank farms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 90–97.
- Shahang, M., Yan, X., & Ruan, D. (2020). A study on a quantitative analysis method for fire and explosion risk assessment of offshore platforms. *Process Safety and Environmental Protection*, 140, 247–258.

- Shahang, M., Yan, X., & Ruan, D. (2020). A study on a quantitative analysis method for fire and explosion risk assessment of offshore platforms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 67, 104212.
- Siswantoro, T., Hidayat, R., & Supriyanto, I. (2019). Hazop study and SIL verification of fuel gas system in oil refinery. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 61, 1–9.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution (2nd ed.)*. ASQ Quality Press.
- U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2025). *Chemical Incident Reports*. U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- Ultra-Tech Consultancy. (2014). *Quantitative risk assessment for Indian Oil Corporation LPG bottling plant*. Ultra-Tech Consultancy.
- Wang, L., Zhang, Z., & Li, Y. (2015). Quantitative risk analysis of offshore fire and explosion accidents: A hybrid approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36, 71–83.
- Yang, M., Khan, F., & Amyotte, P. (2016). Operational risk assessment in chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 41–55.
- Pertamina Hulu Energi. (2025). *Dashboard Process Safety Event Tier 1, Tier 2 dan Tier 3*