

ANALISIS RISIKO PADA MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER (MCHE) MENGUNAKAN METODE HOUSE OF RISK (HOR)

Santosa¹⁾

1) Program Studi Teknik Industri Institut Teknologi Indonesia

E-mail: abisirhan2010@gmail.com

Abstrak

Perkembangan industri Liquefied Natural Gas (LNG) menuntut pengoperasian peralatan dengan tingkat kompleksitas dan risiko tinggi. Salah satu komponen vital dalam proses pencairan gas alam adalah Main Cryogenic Heat Exchanger (MCHE) yang bekerja pada kondisi kriogenik dan tekanan tinggi secara berkesinambungan. Karakteristik ini menjadikan MCHE rentan terhadap kegagalan operasional yang berpotensi menimbulkan insiden serius serta kerugian signifikan. Oleh karena itu, analisis risiko dan penentuan strategi mitigasi yang tepat menjadi aspek penting dalam upaya menjaga keselamatan dan keandalan operasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi agen risiko yang paling berpengaruh terhadap terjadinya kegagalan pada MCHE serta menyusun strategi mitigasi prioritas. Metode yang digunakan adalah House of Risk (HOR), yang dilakukan dalam dua tahap. HOR fase 1 digunakan untuk mengukur potensi risiko, sedangkan HOR fase 2 difokuskan pada pemilihan strategi mitigasi. Hasil analisis menghasilkan empat strategi utama yang diprioritaskan untuk diterapkan, yaitu pelatihan teknisi inspeksi, double-check system operator, program pelatihan berkala, dan kalibrasi sensor gas. Keempat strategi ini dinilai paling efektif dalam mengurangi risiko kritis pada MCHE sekaligus meningkatkan tingkat keselamatan serta keandalan operasional di industri LNG.

Kata Kunci: House of risk, mitigasi risiko, LNG, MCHE

Pendahuluan

Gas alam saat ini merupakan sumber energi global terbesar ketiga karena ketersediaan dan fleksibilitasnya [1]. Industri LNG yang terus berkembang meningkatkan kebutuhan vaporizer lepas pantai dalam beberapa tahun terakhir [2]. Proses pencairan gas alam merupakan tahap krusial karena memerlukan energi tinggi untuk mendinginkan gas menjadi LNG [3]. Pengisian kargo dalam volume besar juga memicu perubahan tekanan signifikan yang berdampak pada konsumsi energi dan margin penjualan [4]; [5]. Secara umum, produksi LNG bergantung pada proses pendinginan intensif gas alam [6].

Dalam proses tersebut, gas alam yang telah dimurnikan dari pengotor seperti H₂S dan CO₂ akan melalui tahap pengeringan sebelum dialirkan ke unit pencairan utama, yaitu *Main Cryogenic Heat Exchanger* (MCHE). Pada unit ini, gas dicairkan pada suhu sekitar -160 °C dan tekanan 50 bar, kemudian dialirkan ke tangki penyimpanan.

MCHE beroperasi pada temperatur kriogenik dan tekanan tinggi secara terus-menerus, sehingga dikategorikan sebagai peralatan berisiko tinggi (high-risk equipment). Tercatat beberapa insiden serius pernah terjadi pada unit ini yang menyebabkan kerugian signifikan bagi operasional industri LNG. Hal tersebut menegaskan pentingnya analisis risiko serta evaluasi efektivitas safeguard pada MCHE guna meminimalkan potensi bahaya [7].

Berbagai strategi telah dikembangkan untuk mengelola risiko, namun sebagian besar masih berfokus pada perspektif internal perusahaan dan seringkali kurang memberikan wawasan menyeluruh [8]; [9]. Secara umum, risiko dapat muncul dalam berbagai bentuk, mulai dari aspek operasional, finansial, hingga lingkungan, yang dapat berdampak signifikan terhadap keberlangsungan industri [10]; [11]; [12]. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai potensi risiko serta sistem peringatan dini menjadi penting dalam mendukung keberlanjutan dan keamanan operasional [13]; [14]; [15]. Penilaian terhadap sumber risiko yang spesifik juga diperlukan sebagai dasar untuk merumuskan strategi mitigasi yang efektif [16]; [17].

Sejumlah penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode House of Risk (HOR) banyak digunakan dalam menganalisis risiko pada berbagai sektor rantai pasok, mulai dari pangan, pertanian, hingga manufaktur. Wahyuni et al. [18] mengidentifikasi risiko pada rantai pasok daging merah dengan menggabungkan model SCOR dan HOR, sedangkan Purwaningsih et al. [19] menerapkan HOR pada rantai pasok bandeng untuk mengidentifikasi risiko kualitas dan distribusi produk. Studi lain menggunakan HOR dalam manajemen risiko produksi alat mekanik pertanian oleh Partiwi et al.

[20], budidaya durian bersertifikat oleh Jittamai et al. [21], serta industri konstruksi oleh Dvaipayana et al [22]. Pendekatan serupa juga diterapkan dalam rantai pasok gula aren oleh Umami et al. [23], pertanian organik oleh Kusriani et al. [24], dan peternakan itik oleh Haswika et al. [25]. Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa HOR efektif dalam mengidentifikasi agen risiko dan merumuskan strategi mitigasi yang terukur.

Namun, kajian penerapan HOR pada sektor energi, khususnya unit kriogenik seperti *Main Cryogenic Heat Exchanger* (MCHE) dalam industri LNG, masih sangat terbatas. Padahal, karakteristik operasi MCHEx yang melibatkan suhu kriogenik dan tekanan tinggi menjadikannya peralatan dengan potensi risiko besar. Hal ini membuka peluang untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai analisis risiko MCHEx dengan pendekatan HOR guna memperkuat manajemen risiko pada industri LNG.

Metodologi Penelitian

Objek penelitian ini adalah unit Liquefaction pada fasilitas LNG, dengan fokus pada *Main Cryogenic Heat Exchanger* (MCHE) beserta sistem pendinginnya, yaitu *Multi Refrigerant Liquid* (MRL) dan *Multi Refrigerant Vapour* (MRV). Unit ini dipilih karena beroperasi pada suhu sangat rendah dan tekanan tinggi sehingga tergolong high risk equipment. Subjek penelitian adalah para expert yang terlibat langsung dalam operasi dan perawatan unit, meliputi manajer operasional, supervisor liquefaction, dan engineer proses. Kriteria expert ditetapkan berdasarkan pengalaman kerja, yaitu minimal 5 tahun.

Data primer dikumpulkan melalui observasi langsung pada proses operasional MCHEx, wawancara semi-terstruktur dengan para expert, serta penyebaran kuesioner untuk memberikan penilaian kuantitatif terhadap risiko. Data sekunder diperoleh dari dokumen internal perusahaan (manual operasi, laporan inspeksi, catatan perawatan), serta literatur akademik dan jurnal terkait manajemen risiko LNG.

Analisis dilakukan dengan metode House of Risk (HOR). Pada tahap HOR 1, risiko dan agen risiko diidentifikasi berdasarkan masukan dari para expert dengan menilai tingkat Severity (S) dan Occurrence (O). Skala penilaian ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 sebagai dasar perhitungan Aggregate Risk Potential (ARP)

Tabel 1. Skala Penilaian Severity (S)

Rating	Dampak	Kriteria
1	Tidak ada	Tidak ada pengaruh terhadap operasi unit, proses berjalan normal.
2	Sangat sedikit	Gangguan sangat kecil, peralatan tetap beroperasi tanpa penurunan kinerja.
3	Sedikit	Terjadi gangguan minor pada komponen, namun tidak memengaruhi output LNG.
4	Sangat rendah	Efek kecil pada performa peralatan, tidak memerlukan perbaikan segera.
5	Rendah	Efek sedang, komponen memerlukan penyesuaian/perbaikan ringan.
6	Sedang	Penurunan kinerja unit, namun produksi LNG tetap dapat berlangsung.
7	Tinggi	Kinerja unit sangat terpengaruh, potensi downtime meningkat.
8	Sangat tinggi	Unit tidak dapat menghasilkan LNG sesuai spesifikasi, tapi masih bisa digunakan.
9	Serius	Komponen/alat membutuhkan perbaikan signifikan sebelum melanjutkan operasi.
10	Berbahaya	Unit tidak dapat beroperasi, menghentikan proses liquefaction secara total.

Tabel 2. Skala Penilaian Occurrence (O)

Rating	Dampak	Keterangan
1	Hampir tidak pernah	Kegagalan tidak mungkin terjadi.
2	Sangat rendah	Langka jumlah kegagalan.
3	Sangat sedikit	Sangat sedikit kegagalan.
4	Rendah	Beberapa kegagalan.
5	Sedang rendah	Jumlah kegagalan sesekali.
6	Sedang	Jumlah kegagalan sedang.
7	Cukup tinggi	Cukup tingginya jumlah kegagalan.
8	Tinggi	Efek sangat tinggi dan tidak bisa beroperasi.
9	Sangat tinggi	Sangat tinggi jumlah kegagalan.
10	Hampir pasti	Kegagalan hampir pasti

Setelah itu dilakukan perhitungan nilai Aggregate Risk Potential (ARP) untuk menentukan prioritas risiko yang perlu ditangani. Nilai ARP dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$ARP = O_i \Sigma_i S_i R_{ij} \quad (1)$$

Keterangan:

ARP : Aggregate Risk Potential

O_j : Occurrence

S_i : Severity

R_{ij} : Nilai Korelasi

Selanjutnya, tahap HOR 2 digunakan untuk merumuskan strategi mitigasi dengan menilai tingkat efektivitas dan kesulitan implementasi (Effectiveness to Difficulty Ratio/ETD), sehingga dapat dipilih strategi mitigasi risiko yang paling tepat untuk unit Liquefaction. dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$ETDk = TEk/Dk \quad (2)$$

Setelah tahap identifikasi dan pemetaan risiko menggunakan HOR, langkah berikutnya adalah menentukan prioritas penanganan. Salah satu alat yang digunakan adalah diagram Pareto, yaitu gabungan diagram batang dan garis yang menyajikan data secara berurutan dari yang paling dominan hingga paling kecil. Dengan prinsip 80-20 yang dipopulerkan oleh Juran, bahwa sekitar 80% dampak permasalahan biasanya bersumber dari 20% penyebab utama. Melalui pendekatan ini, strategi mitigasi dapat difokuskan pada agen risiko yang memberikan kontribusi terbesar terhadap potensi kegagalan sehingga upaya pengendalian menjadi lebih efektif dan efisien.

Hasil dan Pembahasan

Identifikasi dan Penilaian Risiko

Pada fase House of Risk (HOR) 1 dilakukan identifikasi risiko untuk menentukan agen risiko yang menjadi prioritas mitigasi. Tahapan meliputi identifikasi risiko, penilaian tingkat dampak (severity) dan frekuensi kemunculan (occurrence) yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4 sebagai berikut:

Tabel 3. Risk Event dan Penilaian Severity

Unit	Kode	Risk Event	Severity
MCHE	E1	Kebocoran LNG akibat retakan pipa kriogenik	9
	E2	Tekanan berlebih karena kegagalan relief valve	9
	E3	Gagalnya sistem instrumentasi (sensor suhu/tekanan)	7
	E4	Kesalahan operator saat start-up/shutdown	6
	E5	Material fatigue akibat suhu kriogenik ekstrem	7
	E6	Ledakan akibat akumulasi gas bocor di area MCHE	10
	E7	Frosting/condensate berlebih di area sekitar	4
	E8	Kerusakan pompa transfer LNG ke tangki penyimpanan	6
MRL	E9	Kebocoran propane pada sirkuit pendingin	8
	E10	Kebocoran ethane pada jalur pendingin	7
	E11	Gangguan aliran refrigerant	6
	E12	Overpressure pada kompresor MRL	8
MRV	E13	Kebocoran nitrogen dari sistem pendingin	5
	E14	Kebocoran methane dari sistem pendingin	7
	E15	Pendinginan tidak tercapai hingga -160 °C	6
	E16	Gangguan pompa sirkulasi refrigerant	6
	E17	Gagalnya suplai listrik	8

Tabel 4. Risk Agent dan Penilaian Occurrence

Kode	Risk Agent	Occurrence
A1	Kualitas material pipa kriogenik rendah	4
A2	Umur peralatan yang sudah melewati desain life	5
A3	Perawatan preventif tidak terjadwal	6
A4	Kegagalan sistem kontrol tekanan	5
A5	Malfungsi sensor suhu/tekanan	4
A6	Kesalahan operator saat prosedur start-up	6
A7	Kesalahan operator saat shutdown darurat	5
A8	Tidak adanya training lanjutan operator	6
A9	Kegagalan katup pelepas tekanan (relief valve)	3
A10	Gangguan suplai listrik ke sistem kontrol	5
A11	Getaran tinggi pada pompa sirkulasi refrigerant	6
A12	Kebocoran sambungan flange pada jalur propane	4
A13	Kebocoran seal kompresor pada sirkuit MRL	5
A14	Komposisi refrigerant tidak sesuai spesifikasi	4
A15	Gangguan distribusi aliran MRV	5
A16	Kegagalan pompa transfer LNG	4
A17	Pendinginan tidak optimal akibat fouling heat exchanger	5
A18	Akumulasi gas bocor di area MCHE	3
A19	Kegagalan sistem alarm kebocoran gas	4
A20	Kondensasi berlebih pada pipa luar	6
A21	Prosedur inspeksi tidak konsisten	6

Setelah penilaian *severity* dan *occurrence*, dilakukan mencari korelasi antara keduanya. Skala yang digunakan untuk korelasi yaitu 0, 1, 3, dan 9 semakin besar nilai, semakin besar pula hubungan antara kejadian dan kemunculan risiko.

Perhitungan Aggregate Risk Potential (ARP)

Contoh perhitungan ARP sebagai berikut:

$$ARP = O_i \sum S_i R_{ij}$$

$$ARP_1 = 4 [(9 \times 9) + (7 \times 3) + (10 \times 1)]$$

$$ARP_1 = 4 [81 + 21 + 10]$$

$$ARP_1 = 448$$

Pada tahap House of Risk fase 1 dilakukan perhitungan Aggregate Risk Potential (ARP) berdasarkan severity, occurrence, dan tingkat korelasi antara kejadian risiko dan agen risiko. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. HOR Fase 1

Risk Event	Risk Agent											Si
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	
E1	9	3	3			1	1	1		1		9
E2				3				1	9	3		9
E3					9			3				7
E4						9	9	3				6
E5	3	9	3									7
E6	1			3	1	3	3	3	3	1		10
E7												4
E8		3	3			1	1	1		3	3	6
E9												8
E10												7
E11			3	1	3	1	1			1	3	6
E12				3	1		1	1	9	3	1	8

E13											5	
E14											7	
E15			3		1	1	1	1		1	1	6
E16		3	3			1	1	1			9	6
E17		1	1	3	3	3	3	3	3	9		8
Oi	4	5	6	5	4	6	5	6	3	5	6	
ARP	448	670	822	555	516	846	745	822	621	860	624	
Pj	17	9	3	14	15	2	5	4	12	1	11	

Tabel 6. HOR Fase 1 (Lanjutan)

Risk Event	Risk Agent										Si
	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	
E1	1						9	3		3	9
E2							1	1		3	9
E3							1	1			7
E4							1				6
E5				1		3			1		7
E6	1	1				1	9	9		3	10
E7							1		9	1	4
E8					9	1					6
E9	9	3						1			8
E10			1				1			1	7
E11			3	9		3		1		1	6
E12		3		1		1		1			8
E13							1			1	5
E14			1								7
E15			9	9		9	1	1	1		6
E16		1		1	9	1	1			1	6
E17					1		3	3		1	8
Oi	4	5	4	5	4	5	3	4	6	6	
ARP	364	320	344	645	464	615	735	740	294	720	
Pj	18	20	19	10	16	13	7	6	21	8	

Berdasarkan prinsip diagram Pareto, sekitar 20% agen risiko dipilih sebagai prioritas untuk dirancang strategi mitigasinya, dengan harapan dapat mengurangi sebagian besar dampak risiko yang ada. Dari total 21 agen risiko yang teridentifikasi, hasil diskusi dengan para expert menunjukkan bahwa terdapat 8 agen risiko yang dianggap paling berpengaruh dan perlu ditindaklanjuti. Agen risiko prioritas tersebut meliputi A10, A6, A3, A8, A7, A19, A18, dan A21, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Risk Agent Prioritas

Ranking ARP	Kode	Risk Agent	ARP
1	A10	Gangguan suplai listrik ke sistem kontrol	860
2	A6	Kesalahan operator saat prosedur start-up	846
3	A3	Perawatan preventif tidak terjadwal	822
4	A8	Tidak adanya training lanjutan operator	822
5	A7	Kesalahan operator saat shutdown darurat	745
6	A19	Kegagalan sistem alarm kebocoran gas	740
7	A18	Akumulasi gas bocor di area MCHE	735
8	A21	Prosedur inspeksi tidak konsisten	720

Perancangan Strategi Penanganan

Hasil House of Risk fase 1 menunjukkan sejumlah sumber risiko prioritas yang perlu mendapatkan tindakan pencegahan agar potensi terjadinya risiko dapat ditekan atau dihilangkan. Strategi penanganan ini disusun berdasarkan diskusi dengan para expert, yang mencakup tindakan teknis maupun prosedural. Rekomendasi strategi penanganan ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Strategi Penanganan

Kode	Risk Agent	Preventive Action	Kode	Dk
A10	Gangguan suplai listrik ke sistem kontrol	Melakukan maintenance rutin panel distribusi listrik dan kabel kontrol.	PA1	3
		Menambah redundansi jalur listrik khusus untuk sistem kontrol kritis.	PA2	5
A6	Kesalahan operator saat prosedur start-up	Menyusun SOP start-up terstandarisasi dengan checklist wajib.	PA3	3
		Mengadakan simulasi start-up rutin menggunakan training simulator.	PA4	4
		Menerapkan double-check system oleh dua operator berbeda sebelum aktivasi.	PA5	3
A3	Perawatan preventif tidak terjadwal	Melakukan audit kepatuhan jadwal perawatan secara periodik.	PA6	3
		Membuat jadwal perawatan berbasis CMMS (Computerized Maintenance Management System).	PA7	4
A8	Tidak adanya training lanjutan operator	Menyusun program pelatihan berkala sesuai perkembangan teknologi LNG.	PA8	4
		Melaksanakan sertifikasi kompetensi internal untuk operator.	PA9	4
A7	Kesalahan operator saat shutdown darurat	Membuat prosedur darurat berbentuk flowchart visual di ruang kontrol.	PA10	3
		Menggunakan sistem interlock otomatis untuk kondisi kritis tertentu.	PA11	5
A19	Kegagalan sistem alarm kebocoran gas	Melakukan kalibrasi sensor gas secara rutin sesuai standar pabrikan.	PA12	3
		Menambahkan redundansi sensor gas di area kritis MCHE.	PA13	5
		Memasang sistem alarm ganda (auditori & visual).	PA14	4
A18	Akumulasi gas bocor di area MCHE	Meningkatkan sistem ventilasi dan exhaust fan di area kriogenik.	PA15	5
		Melaksanakan inspeksi harian sambungan pipa dan valve.	PA16	3
A21	Prosedur inspeksi tidak konsisten	Membuat SOP inspeksi detail dengan checklist standar.	PA17	3
		Melakukan pelatihan teknisi inspeksi secara berkala.	PA18	4

Tabel 8 memperlihatkan keterkaitan antara agen risiko prioritas dengan tindakan pencegahan yang sesuai, beserta tingkat kesulitan implementasi (Dk). Informasi ini menjadi dasar untuk tahap selanjutnya, yaitu perhitungan Total Effectiveness (TEK) dan Rasio Effectiveness to Difficulty (ETDk), guna menentukan strategi yang paling efektif untuk diterapkan. Hasil perhitungan House of Risk fase 2 ditampilkan pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9. House of Risk Fase 2

Risk Agent	Preventive Action									ARP
	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7	PA8	PA9	
A10	9	9								860
A6			9		9			3	3	846
A3						9	9			822
A8				3	3			9	3	822
A7				3	9			3	3	745
A19										740
A18						1				735
A21										720
Tek	7740	7740	7614	4701	10026	8133	7398	12171	7239	
Dk	3	5	3	4	3	3	4	4	4	

ETD	2580	1548	2538	1175	3342	2711	1850	3043	1810
Rank	6	16	7	18	2	5	13	3	14

Tabel 10. House of Risk Fase 2 (Lanjutan)

Risk Agent	Preventive Action									ARP
	PA10	PA11	PA12	PA13	PA14	PA15	PA16	PA17	PA18	
A10										860
A6		1								846
A3										822
A8									9	822
A7	9	9								745
A19		3	9	3	9	1				740
A18		3	3	9	3	9				735
A21					1		9	9	9	720
Tek	6705	11976	8865	8835	9585	7355	6480	6480	13878	
Dk	3	5	3	5	4	5	3	3	4	
ETD	2235	2395	2955	1767	2396	1471	2160	2160	3470	
Rank	10	9	4	15	8	17	11	12	1	

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.10 HOR fase 2, diperoleh urutan strategi mitigasi dengan nilai ETDk tertinggi. Tabel 11 berikut menyajikan peringkat prioritas strategi mitigasi menurut hasil analisis house of risk fase 2:

Tabel 11. Urutan Prioritas Mitigasi

Kode	Preventive Action	Rank
PA18	Melakukan pelatihan teknisi inspeksi secara berkala.	1
PA5	Menerapkan double-check system oleh dua operator berbeda sebelum aktivasi.	2
PA8	Menyusun program pelatihan berkala sesuai perkembangan teknologi LNG.	3
PA12	Melakukan kalibrasi sensor gas secara rutin sesuai standar pabrikan.	4
PA6	Melakukan audit kepatuhan jadwal perawatan secara periodik.	5
PA1	Melakukan maintenance rutin panel distribusi listrik dan kabel kontrol.	6
PA3	Menyusun SOP start-up terstandarisasi dengan checklist wajib.	7
PA14	Memasang sistem alarm ganda (auditori & visual).	8
PA11	Menggunakan sistem interlock otomatis untuk kondisi kritis tertentu.	9
PA10	Membuat prosedur darurat berbentuk flowchart visual di ruang kontrol.	10
PA16	Melaksanakan inspeksi harian sambungan pipa dan valve.	11
PA17	Membuat SOP inspeksi detail dengan checklist standar.	12
PA7	Membuat jadwal perawatan berbasis Computerized Maintenance Management System.	13
PA9	Melaksanakan sertifikasi kompetensi internal untuk operator.	14
PA13	Menambahkan redundansi sensor gas di area kritis MCHE.	15
PA2	Menambah redundansi jalur listrik khusus untuk sistem kontrol kritis.	16
PA15	Meningkatkan sistem ventilasi dan exhaust fan di area kriogenik.	17
PA4	Mengadakan simulasi start-up rutin menggunakan training simulator.	18

Hasil perhitungan ETD menunjukkan bahwa dari 18 strategi, empat strategi mitigasi utama dipilih karena memberikan kontribusi terbesar, yaitu PA18, PA5, PA8, dan PA12. Dengan mempertimbangkan keefektifan penerapan serta besarnya kontribusi terhadap nilai ETD, empat strategi tersebut ditetapkan sebagai prioritas utama dalam mitigasi risiko.

1. PA18 – Pelatihan teknisi inspeksi

Strategi ini berfokus pada peningkatan keterampilan teknisi dalam melaksanakan inspeksi rutin maupun mendetail. Dengan pelatihan yang tepat, teknisi dapat lebih cepat mengidentifikasi potensi kerusakan atau anomali sehingga risiko kegagalan dapat diminimalkan.

2. PA5 – Double-check system operator
Penerapan sistem pemeriksaan ganda bagi operator bertujuan menekan kemungkinan kesalahan manusia. Verifikasi ulang pada tahapan operasional penting akan memastikan prosedur berjalan lebih akurat serta memperkuat keandalan sistem.
3. PA8 – Program pelatihan berkala
Melalui pelatihan berkala, keterampilan dan kesiapan seluruh personel tetap terjaga sesuai kebutuhan operasional. Program ini juga membantu memastikan bahwa tenaga kerja selalu mengikuti perkembangan teknologi maupun prosedur terbaru dalam sistem.
4. PA12 – Kalibrasi sensor gas
Kalibrasi sensor gas secara rutin sangat penting untuk menjaga sensitivitas dan akurasi deteksi kebocoran. Dengan sensor yang andal, potensi bahaya akibat kebocoran dapat diantisipasi sejak dini sebelum menimbulkan dampak serius.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan ETD, pemilihan strategi mitigasi difokuskan pada empat tindakan utama. Keempat strategi tersebut dinilai paling efektif karena mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pengendalian risiko, sekaligus realistis untuk diterapkan dalam operasional. Dengan prioritas tersebut, perusahaan dapat meningkatkan keandalan sistem, meminimalkan kesalahan manusia, serta memperkuat deteksi dini potensi bahaya, sehingga risiko keselamatan dan operasional dapat ditekan secara optimal. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada jumlah responden dan lingkup data yang digunakan, yang sebagian besar hanya mencakup hasil wawancara dan observasi pada kondisi operasional tertentu. Selain itu, penilaian hubungan antara risk agent dan preventive action masih bersifat subjektif karena sangat bergantung pada pengalaman serta sudut pandang responden. Penelitian berikutnya disarankan untuk melibatkan lebih banyak data kuantitatif, misalnya melalui pencatatan historis kejadian risiko dan data sensor otomatis, agar hasilnya lebih objektif. Selain itu, dapat dilakukan pengembangan metode dengan membandingkan House of Risk dengan pendekatan lain seperti FMEA atau Bow-Tie Analysis untuk melihat konsistensi hasil. Penelitian lanjutan juga dapat memperluas ruang lingkup ke sistem pendukung lain dalam rantai pasokan LNG sehingga diperoleh gambaran mitigasi risiko yang lebih menyeluruh.

Daftar Pustaka

- [1] C. Sun, X. Cao, Y. Li, J. Zhu and L. Liu, "Improvement of offshore adaptability of main cryogenic heat exchanger in FLNG dual mixed refrigerant liquefaction process," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 169, p. 120909, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120909>.
- [2] J. Bai, J. Pan, X. He, K. Wang, L. Tang and R. Yang, "Numerical investigation on thermal hydraulic performance of supercritical LNG in sinusoidal wavy channel based printed circuit vaporizer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 175, p. 115379, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115379>.
- [3] H. Son, B. Austbø, T. Gundersen, J. Hwang and Y. Lim, "Techno-economic versus energy optimization of natural gas liquefaction processes with different heat exchanger technologies," *Energy*, vol. 245, p. 123232, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123232>.
- [4] Z. Bouabidi, F. Almomani, E. I. Al-musleh, M. A. Katebah, M. M. Hussein, A. R. Shazed, I. A. Karimi and H. Alfadala, "Study on Boil-off Gas (BOG) Minimization and Recovery Strategies from Actual Baseload LNG Export Terminal: Towards Sustainable LNG Chains," *Energies*, vol. 14, no. 12, p. 3478, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14123478>.
- [5] P. Stringari, M. Campestrini, N. G. Ince, D. Bluck, S. Hirohama, F. Garcia and J.-J. Bartuel, "Toward an optimized design of the LNG production process: Measurement

- and modeling of the solubility limits of p-xylene in methane and methane + ethane mixtures at low temperature," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 556, p. 113406, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2022.113406>.
- [6] M. Hareem, F. Raza, B. Kazmi, R. Ghauri, K. Zafar, H. Ahmed, S. A. A. Taqvi and M. Naqvi, "Sustainability evaluation of C3MR natural gas liquefaction process: Integrating life cycle analysis with Energy, Exergy, and economic aspects," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 137, pp. 619-636, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.05.041>.
- [7] A. Kurani, P. Doshi, A. Vakharia and M. Shah, "A Comprehensive Comparative Study of Artificial Neural Network (ANN) and Support Vector Machines (SVM) on Stock Forecasting," *Annals of Data Science*, vol. 10, pp. 183-208, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40745-021-00344-x>.
- [8] M. Munir, M. S. S. Jajja, K. A. Chatha and S. Farooq, "Supply chain risk management and operational performance: The enabling role of supply chain integration," *International Journal of Production Economics*, vol. 227, p. 107667, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107667>.
- [9] Y. Zou, Y. Xu and C. Zhang, "A Risk-Averse Adaptive Stochastic Optimization Method for Transactive Energy Management of a Multi-Energy Microgrid," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 14, no. 3, pp. 1599-1611, 2022. [10.1109/TSTE.2023.3240184](https://doi.org/10.1109/TSTE.2023.3240184).
- [10] C. Wang, Z. Cheng, X.-G. Yue and M. McAleer, "Risk Management of COVID-19 by Universities in China," *Journal of Risk and Financial Management*, vol. 13, no. 2:36, 2020. <https://doi.org/10.3390/jrfm13020036>.
- [11] S.-S. Lin, S.-L. Shen, A. Zhou and Y.-S. Xu, "Risk assessment and management of excavation system based on fuzzy set theory and machine learning methods," *Automation in Construction*, vol. 122, p. 103490, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103490>.
- [12] A. Kumar, S. K. Mangla, P. Kumar and M. Song, "Mitigate risks in perishable food supply chains: Learning from COVID-19," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 166, p. 120643, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120643>.
- [13] E. Dumitrescu, S. Hue, C. Hurlin and S. Tokpavi, "Machine learning for credit scoring: Improving logistic regression with non-linear decision-tree effects," *European Journal of Operational Research*, vol. 297, no. 3, pp. 1178-1192, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.06.053>.
- [14] O. Rodríguez-Espíndola, S. Chowdhury, P. K. Dey, P. Albores and A. Emrouznejad, "Analysis of the adoption of emergent technologies for risk management in the era of digital manufacturing," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 178, p. 121562, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121562>.
- [15] J. Zhang, X. Zhang, Y. Zhou, Q. Han, X. Wang, C. Song, S. Wang and S. Zhao, "Occurrence, distribution and risk assessment of antibiotics at various aquaculture stages in typical aquaculture areas surrounding the Yellow Sea," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 126, pp. 621-632, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.024>.
- [16] H. Zhou, X. Yue, Y. Chen and Y. Liu, "Source-specific probabilistic contamination risk and health risk assessment of soil heavy metals in a typical ancient mining area Author links open overlay panel," *Science of The Total Environment*, vol. 906, p. 167772, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167772>.

- [17] Y. Guo, Y. Jin, S. Hu, Z. Yang, Y. Xi and B. Han, "Risk evolution analysis of ship pilotage operation by an integrated model of FRAM and DBN," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 229, p. 108850, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108850>.
- [18] D. Wahyuni, A. H. Nasution, I. Budiman and N. Arfidhila, "Halal Risk Analysis at Indonesia Slaughterhouses Using the Supply Chain Operations Reference (SCOR) and House of Risk (HOR) Methods," in *TALENTA-International Conference on Science and Technology 2019*, 2020. 10.1088/1742-6596/1542/1/012001.
- [19] R. Purwaningsih and F. A. Hermawan, "Risk analysis of milkfish supply chains in Semarang using house of risk approach to increase the supply chain resilience," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. 10.1088/1755-1315/649/1/012018.
- [20] S. G. Partiw, V. N. Islami and H. Firmanto, "House of Risk (HOR) Approach to Manage Risk involving Multi-stakeholders: The Case of Automotive Industry Cluster of Multifunctional Rural Mechanized Tool (MRMT)," *Operations and Supply Chain Management*, vol. 16, no. 1, p. 133 – 139, 2023. <http://doi.org/10.31387/oscm0520378>.
- [21] P. Jittamai, S. Toek, P. Sathaporn, K. Kongkanjana and C. Natdanai, "Risk Mitigation in Durian Cultivation in Thailand Using the House of Risk (HOR) Method: A Case Study of Pak Chong GI Durian," *Sustainability*, vol. 17, no. 1, p. 222, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17010222>.
- [22] M. A. T. Dvaipayana, I. K. Sriwana and Y. Prambudia, "Design of Supply Chain Risk Mitigation System Using House of Risk and Fuzzy AHP Methods in Precast Concrete," *Sinergi*, vol. 28, no. 1, pp. 93-102, 2024. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2024.1.010>.
- [23] N. Umami, Marimin, E. Noor and A. Iskandar, "Framework of risk priority and risk mitigation approach for palm sugar reverse supply chain," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 909, p. 012075, 2020. 10.1088/1757-899X/909/1/012075.
- [24] E. Kusri, N. Aini, A. R. Putri and B. Syufri, "Risk Mitigation Strategy Using the House of Risk (HOR) Method for Organic Farming Supplier in Sustainable Supply Chain," in *International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI)*, 2021. 10.1109/ICDABI53623.2021.9655956..
- [25] Haswika, A. Mansur and M. F. N. Maghfiroh, "Risk Mitigation Strategies for Sustainable Poultry Supply Chain Management," *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology (ASSET)*, vol. 6, no. 4, pp. 02404011-01 ~ 02404011-08, 2024. <https://doi.org/10.26877/asset.v6i4.997>.