



Analisis Risiko Internal *Leakage* pada LPG Treating Unit Menggunakan Metode *Failure Mode and Effects Analysis*

Muhamad Prima Maulana Putra^{1*}, Manik Ayu Titisari²

^{1,2} Teknik Industri, Universitas PGRI Adi Buana, Surabaya, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received April 20, 2026

Revised Mei 25, 2026

Accepted Juni 19, 2026

Available online Juli 21, 2026

Kata Kunci:

internal leakage;

LPG Treating Unit;

FMEA;

keselamatan proses;

risiko kegagalan

Keywords:

internal leakage;

LPG Treating Unit;

Failure Mode and Effects Analysis;

process safety;

failure risk

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.

Copyright © 2022 by Author. Published by Universitas PGRI ADI BUANA SURABAYA.

ABSTRAK

Internal *leakage* pada LPG Treating Unit dapat menurunkan kestabilan proses, menyebabkan kehilangan produk, dan melemahkan fungsi keselamatan operasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko *internal leakage* pada sistem valve dan *pressure containment* menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis*. Data diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara semi-terstruktur, histori gangguan, dan parameter operasi. Lima mode kegagalan dianalisis, yaitu *passing control valve* LPG, *internal leakage* pada ESD valve, *passing nitrogen valve*, *seat leakage* pada PSV, dan *leakage flange connection*. Hasil menunjukkan bahwa *passing control valve* LPG memiliki nilai risiko tertinggi sebesar 336, diikuti *internal leakage* pada ESD valve sebesar 315. Keduanya termasuk risiko tinggi karena mempengaruhi tekanan, kehilangan produk, dan fungsi isolasi darurat. Mitigasi melalui *predictive maintenance*, inspeksi berkala, serta penggantian *seat* dan *seal* diperkirakan menurunkan risiko lebih dari 50%.

ABSTRACT

Internal *leakage* in LPG Treating Units could reduce process stability, increase product loss, and weaken operational safety barriers. This study aimed to analyze the risk of internal leakage in valve systems and pressure containment equipment using *Failure Mode and Effects Analysis*. Data were obtained through field observations, semi-structured interviews, historical failure records, and operating parameters. Five failure modes were identified, including LPG control valve passing, internal leakage in emergency shutdown valves, nitrogen valve passing, pressure safety valve seat leakage, and flange connection leakage. The results showed that LPG control valve passing had the highest risk value of 336, followed by emergency shutdown valve internal leakage with a value of 315. Both failure modes were classified as high-risk conditions because they affected pressure stability, product loss, and emergency isolation reliability. Mitigation through predictive maintenance, periodic inspection, and seat and seal replacement was estimated to reduce the risk level by more than 50%.

I. PENDAHULUAN

Keselamatan proses pada industri minyak dan gas menuntut kemampuan sistem untuk menjaga integritas peralatan, kestabilan tekanan, dan keandalan *barrier* keselamatan ketika fluida mudah terbakar diproses dalam kondisi bertekanan. *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) Treating Unit termasuk sistem kritis karena menangani fraksi LPG yang mengandung hidrokarbon ringan, gas asam, dan senyawa sulfur yang harus diturunkan sampai memenuhi spesifikasi produk [1]–[4]. Pada sistem tersebut, *internal leakage* menjadi masalah teknis yang tidak selalu tampak secara visual, tetapi dapat menyebabkan *product loss*, ketidakstabilan tekanan, kontaminasi antar jalur fluida, dan penurunan efektivitas isolasi darurat. Secara kuantitatif, data penelitian menunjukkan deviasi tekanan LPG dari kondisi normal 8 barg menjadi 6,9–8,5 barg, deviasi flow LPG dari 120 m³/jam menjadi 110–125 m³/jam, serta deviasi tekanan

*Corresponding author.

E-mail addresses: manikayu@unipasby.ac.id

nitrogen dari 5 barg menjadi 4,1–5,4 barg. Deviasi ini menunjukkan bahwa *internal leakage* tidak hanya berkaitan dengan kerusakan komponen, tetapi juga mempengaruhi stabilitas operasi dan keandalan *pressure containment*. Dalam kerangka *process safety*, kegagalan kecil seperti *passing valve* perlu diperlakukan sebagai sinyal teknis awal karena kecelakaan proses umumnya berawal dari penurunan fungsi *barrier* yang tidak dikendalikan secara sistematis [5]–[9].

Kajian terdahulu telah menunjukkan bahwa kegagalan *valve*, *seal*, *seat*, *packing*, dan sistem proteksi tekanan merupakan penyebab penting penurunan keandalan fasilitas proses. *Internal leakage* pada *ball valve* dapat dipicu oleh keausan *seat*, goresan permukaan sealing, korosi, erosi, deposit, degradasi *grease*, dan kegagalan gaya penekanan pada *seat* [10]–[13]. Deteksi kegagalan juga menjadi persoalan penting karena kebocoran internal sering baru terlihat melalui perubahan tekanan, suara fluida, vibrasi, atau tren operasi yang tidak langsung [14]–[16]. Pada sistem LPG, tingkat bahaya menjadi lebih tinggi karena LPG memiliki tekanan uap relatif tinggi, mudah terbakar, dan uapnya dapat terkumpul di area rendah sehingga meningkatkan risiko kebakaran dan ledakan bila terjadi *deviasi containment* [17]–[19]. Penilaian risiko industri proses menunjukkan bahwa FMEA masih banyak digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan, mengukur tingkat keparahan, kemungkinan kejadian, kemampuan deteksi, dan menentukan prioritas tindakan perbaikan [20]–[22]. Pengembangan FMEA dengan pendekatan fuzzy, grey relational analysis, dan modified FMEA juga telah digunakan pada sistem pipa petroleum dan fasilitas LPG untuk meningkatkan ketepatan prioritas risiko [23], [24].

Meskipun penelitian sebelumnya telah membahas risiko *valve*, sistem perpipaan, *pressure relief valve*, dan fasilitas LPG secara umum, masih terdapat kesenjangan pada kajian yang secara spesifik menghubungkan *internal leakage* di *LPG Treating Unit* dengan variabel teknis operasi, nilai risiko *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), dan prioritas mitigasi berbasis data lapangan. Studi Yusof dan Abdullah [25] menegaskan bahwa *seat* dan *packing* pada *butterfly valve* memiliki kontribusi penting terhadap kegagalan *valve*, sedangkan Sotoodeh [26] menunjukkan bahwa *seat leakage* dan kerusakan *body* pada *pipeline ball valve* dapat menghasilkan risiko operasi yang tinggi. Namun, kedua studi tersebut belum menempatkan *internal leakage* sebagai deviasi proses pada *LPG Treating Unit* yang berkaitan langsung dengan kestabilan tekanan, kehilangan produk, fungsi isolasi darurat, dan efektivitas *safety barrier*. Di sisi lain, kajian *process safety modern* menekankan bahwa risiko tidak cukup dinilai dari frekuensi kegagalan, tetapi perlu dikaitkan dengan konsekuensi, kemampuan deteksi, dan kontribusi kegagalan terhadap pelemahan lapisan proteksi [27]–[30]. Kesenjangan ini menjadi dasar penting bagi penelitian empiris yang mengukur risiko *internal leakage* secara lebih spesifik pada sistem *valve* dan *pressure containment* di *LPG Treating Unit*.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penyajian analisis empiris *internal leakage* yang menghubungkan lima mode kegagalan utama dengan indikator risiko kuantitatif, yaitu *severity*, *occurrence*, *detection*, dan nilai *Risk Priority Number*. Berbeda dari penelitian terdahulu yang lebih banyak membahas kegagalan *valve* atau perpipaan secara umum, penelitian ini memusatkan perhatian pada *LPG Treating Unit* sebagai sistem proses yang memiliki interaksi antara jalur LPG, nitrogen, PSV, ESD *valve*, *control valve*, dan *flange connection*. Kontribusi utama penelitian ini adalah menentukan urutan prioritas risiko berdasarkan data lapangan dan hasil penilaian FMEA, sehingga mitigasi tidak disusun secara umum, tetapi diarahkan pada *failure mode* dengan nilai risiko tertinggi. Hasil awal menunjukkan bahwa *passing control valve* LPG memiliki nilai risiko tertinggi sebesar 336, diikuti *internal leakage* pada ESD *valve* sebesar 315, *passing nitrogen valve* sebesar 252, *seat leakage* pada PSV sebesar 160, dan *leakage flange connection* sebesar 100. Urutan ini menunjukkan bahwa kegagalan pada *control valve* dan ESD *valve* merupakan prioritas utama karena mempengaruhi kestabilan tekanan, kehilangan produk, dan keandalan sistem isolasi darurat.

Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko *internal leakage* pada *LPG Treating Unit* menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis*. Secara khusus, penelitian ini mengidentifikasi mode kegagalan utama pada sistem *valve* dan *pressure containment*, menilai tingkat risiko setiap mode kegagalan berdasarkan *parameter severity*, *occurrence*, dan *detection*, serta menyusun prioritas mitigasi berdasarkan nilai risiko tertinggi. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan memberikan kontribusi teknis bagi penguatan *process safety*, pemeliharaan berbasis risiko, dan peningkatan keandalan operasi *LPG Treating Unit*.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian lapangan dengan analisis deskriptif kuantitatif untuk menilai risiko *internal leakage* pada LPG Treating Unit. Pendekatan FMEA dipilih karena mampu mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab, dampak, pengendalian yang tersedia, serta prioritas tindakan berdasarkan parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection* [20], [31]. Dalam industri proses, FMEA relevan digunakan karena risiko tidak hanya ditentukan oleh konsekuensi kegagalan, tetapi juga oleh kemungkinan kejadian dan kemampuan sistem mendeteksi kegagalan sebelum berdampak terhadap operasi [23], [28].

Objek penelitian difokuskan pada sistem *valve* dan *pressure containment* yang berpotensi menyebabkan *internal leakage*, yaitu *control valve* LPG, *ESD valve*, *nitrogen valve*, *PSV*, dan *flange connection*. Pemilihan objek tersebut didasarkan pada temuan lapangan berupa *passing valve*, ketidakstabilan tekanan, *seat leakage*, dan indikasi penurunan fungsi isolasi sistem pada LPG Treating Unit. Fokus ini sejalan dengan penelitian Yusof dan Abdullah [25] yang menunjukkan bahwa komponen *valve* seperti *seat* dan *packing* rentan menyebabkan kegagalan *sealing*, serta Sotoodeh [26] yang menempatkan *seat leakage* sebagai salah satu sumber risiko penting pada *pipeline ball valve*.

Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi kondisi fisik peralatan, identifikasi indikasi *internal leakage*, serta wawancara semi-terstruktur dengan operator, teknisi pemeliharaan, dan engineer proses. Data sekunder meliputi histori gangguan, parameter operasi, dokumen teknis, serta catatan tindakan pemeliharaan. Penggunaan kombinasi observasi, wawancara, dan histori gangguan diperlukan karena *internal leakage* sering tidak terlihat secara visual dan perlu dikenali melalui perubahan tekanan, laju alir, suara fluida, vibrasi, serta tren operasi [12], [15].

Parameter operasi yang digunakan meliputi tekanan LPG, temperatur LPG, laju alir LPG, dan tekanan nitrogen. Berdasarkan data lapangan, tekanan LPG normal sebesar 8 barg mengalami deviasi menjadi 6,9–8,5 barg, laju alir LPG normal 120 m³/jam berubah menjadi 110–125 m³/jam, dan tekanan nitrogen normal 5 barg berubah menjadi 4,1–5,4 barg. Deviasi tersebut digunakan sebagai dasar teknis untuk menghubungkan mode kegagalan dengan dampak operasi, terutama ketidakstabilan tekanan, *product loss*, kontaminasi jalur LPG, dan penurunan efektivitas *safety barrier*.

Variabel penelitian terdiri atas variabel penyebab, variabel penilaian risiko, dan variabel keluaran. Variabel penyebab mencakup keausan *seat* dan *seal*, kerusakan *packing*, korosi dan erosi internal, deposit pada *seat*, kelelahan gasket, dan ketidaksempurnaan fungsi isolasi. Variabel penilaian risiko terdiri atas *severity*, *occurrence*, dan *detection*. Variabel keluaran berupa nilai *Risk Priority Number*, kategori risiko, urutan prioritas, dan rekomendasi mitigasi. Struktur variabel ini mengikuti prinsip FMEA yang menilai kegagalan berdasarkan konsekuensi, peluang kejadian, dan kemampuan deteksi [20], [32].

Penilaian *severity* menunjukkan tingkat dampak kegagalan terhadap keselamatan proses, stabilitas operasi, kehilangan produk, dan fungsi *safety barrier*. Penilaian *occurrence* menunjukkan kemungkinan atau frekuensi kegagalan berdasarkan histori gangguan dan informasi lapangan. Penilaian *detection* menunjukkan kemampuan sistem pengendalian, inspeksi, dan pemantauan operasi dalam mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan konsekuensi. Prinsip ini sejalan dengan penerapan FMEA pada fasilitas LPG dan sistem pipa *petroleum* yang menggunakan kombinasi nilai keparahan, kemungkinan, dan deteksi untuk menentukan prioritas risiko [24], [33].

Nilai risiko dihitung menggunakan persamaan:

$$RPN = S \times O \times D$$

dengan RPN sebagai *Risk Priority Number*, *S* sebagai *severity*, *O* sebagai *occurrence*, dan *D* sebagai *detection*. Nilai RPN digunakan untuk menentukan urutan prioritas mitigasi. Kategori risiko ditetapkan menjadi tiga tingkat, yaitu rendah untuk RPN 1–150, sedang untuk RPN 151–300, dan tinggi untuk RPN lebih dari 300. Klasifikasi ini digunakan agar mode kegagalan dengan konsekuensi tinggi, frekuensi berulang, dan deteksi lemah memperoleh prioritas penanganan lebih awal. Pendekatan prioritisasi ini konsisten dengan penerapan FMEA pada analisis kegagalan *valve*, *pressure relief valve*, dan sistem keselamatan proses [22], [25], [26].

Tabel 1. Struktur Penilaian FMEA

No	Mode Kegagalan	Penyebab Utama	Dampak Sistem	S	O	D	RPN	Kategori
1	<i>Passing control valve</i> LPG	Kearusan <i>seat valve</i>	Ketidakstabilan tekanan dan <i>product loss</i>	8	7	6	336	Tinggi
2	<i>Internal leakage</i> ESD valve	Kerusakan <i>seal</i> dan <i>packing</i>	Kegagalan isolasi darurat	9	5	7	315	Tinggi
3	<i>Passing nitrogen</i> valve	Korosi dan erosi internal	Kontaminasi jalur LPG dan ketidakseimbangan tekanan	7	6	6	252	Sedang
4	<i>Seat leakage</i> PSV	Deposit dan partikel pada <i>seat</i>	Penurunan efektivitas proteksi tekanan	8	4	5	160	Sedang
5	<i>Leakage flange</i> connection	Gasket aus dan kelelahan	Kebocoran minor dan penurunan tekanan	5	5	4	100	Rendah

Sumber : Hasil Observasi dan Olahan Data (2026)

Analisis dilakukan dengan mengurutkan nilai RPN dari tertinggi ke terendah, kemudian menghubungkan hasil tersebut dengan kondisi teknis peralatan, penyebab kegagalan, dampak terhadap proses, dan fungsi *safety barrier*. Mode kegagalan dengan RPN tertinggi ditetapkan sebagai prioritas utama mitigasi. Pertimbangan *safety barrier* digunakan karena *internal leakage* pada valve dan PSV dapat mengurangi kemampuan sistem dalam mencegah eskalasi skenario kecelakaan proses [7], [29], [30].

Rekomendasi mitigasi disusun berdasarkan karakteristik kegagalan dan nilai prioritas risiko. Tindakan mitigasi meliputi *predictive maintenance*, inspeksi berkala, penggantian *seat*, *seal*, dan *packing*, *function test* ESD valve, *overhaul* PSV, pemantauan korosi, serta pengencangan ulang atau penggantian gasket pada *flange connection*. Evaluasi penurunan risiko dilakukan dengan membandingkan RPN awal dan RPN setelah skenario mitigasi. Karena evaluasi pasc mitigasi masih berbasis skenario teknis, hasilnya diposisikan sebagai estimasi pengurangan risiko yang perlu divalidasi melalui log DCS, laporan inspeksi, *work order maintenance*, dan *proof test* peralatan keselamatan.

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *internal leakage* pada LPG Treating Unit terjadi pada beberapa komponen kritis yang berkaitan langsung dengan pengaturan aliran, isolasi darurat, proteksi tekanan, dan integritas sambungan perpipaan. Berdasarkan observasi lapangan, wawancara, histori gangguan, dan parameter operasi, lima mode kegagalan utama berhasil diidentifikasi, yaitu *passing control valve* LPG, *internal leakage* pada ESD valve, *passing nitrogen valve*, *seat leakage* pada PSV, dan *leakage flange connection* . Temuan ini sejalan dengan kajian Yusof dan Abdullah [25] yang menunjukkan bahwa komponen *seat* dan *packing* merupakan bagian valve yang rentan mengalami degradasi, serta Sotoodeh [26] yang menempatkan *seat leakage* sebagai salah satu penyebab penting kegagalan valve pada sistem minyak dan gas.

a) Hasil Identifikasi Mode Kegagalan

Identifikasi mode kegagalan menunjukkan bahwa sumber utama *internal leakage* berasal dari degradasi komponen penyekat, korosi dan erosi internal, deposit pada permukaan *seat*, serta kelelahan material gasket. Pada *control valve* LPG, mode kegagalan utama berupa *passing valve* yang disebabkan oleh keausan *seat valve*. Dampaknya terlihat pada ketidakstabilan tekanan dan potensi *product loss*. Pada ESD valve, *internal leakage* terjadi akibat kerusakan *seal* dan *packing*, sehingga fungsi isolasi darurat dapat melemah. Pada nitrogen valve, *passing valve* berhubungan dengan korosi dan erosi internal yang menyebabkan ketidakseimbangan tekanan serta potensi kontaminasi jalur LPG. Pada PSV, *seat leakage* dipicu oleh deposit dan partikel pada *seat*, sedangkan pada *flange connection*, kebocoran berkaitan dengan keausan gasket dan kelelahan sambungan .

Tabel 2. Mode Kegagalan, Penyebab, dan Dampak Sistem

No	Komponen	Mode Kegagalan	Penyebab Utama	Dampak Sistem
1	Control valve LPG	Passing control valve	Keausan seat valve	Ketidakstabilan tekanan dan <i>product loss</i>
2	ESD valve	Internal leakage	Kerusakan seal dan packing	Kegagalan isolasi darurat
3	Nitrogen valve	Passing valve	Korosi dan erosi internal	Kontaminasi jalur LPG dan ketidakseimbangan tekanan
4	PSV	Seat leakage	Depositi dan partikel seat	Penurunan efektivitas proteksi tekanan
5	Flange connection	Leakage connection	Gasket aus dan kelelahan	Kebocoran minor dan penurunan tekanan

Sumber : Olahan Data (2026)

Hasil ini menunjukkan bahwa *internal leakage* tidak dapat dipandang sebagai kegagalan minor karena setiap mode kegagalan memiliki hubungan dengan fungsi proses yang berbeda. *Control valve* mempengaruhi kestabilan aliran, *ESD valve* menentukan keandalan isolasi darurat, *nitrogen valve* mempengaruhi pemisahan utilitas dan proses, *PSV* berperan sebagai proteksi tekanan lebih, sedangkan *flange connection* menjaga integritas sambungan perpipaan. Shi, Cao, dan Ye [12]) menegaskan bahwa *internal leakage* pada valve dapat dideteksi melalui perubahan tekanan kavitas dan pola operasi, sedangkan Ye, Xu, dan Wu [15] menunjukkan bahwa kebocoran internal sering membutuhkan pendekatan pemantauan sinyal karena indikasinya tidak selalu tampak secara visual.

b) Hasil Parameter Operasi

Data parameter operasi menunjukkan adanya deviasi tekanan dan aliran pada *LPG Treating Unit*. Tekanan LPG normal sebesar 8 barg mengalami variasi menjadi 6,9–8,5 barg. Laju alir LPG normal sebesar 120 m³/jam berubah menjadi 110–125 m³/jam. Tekanan nitrogen normal sebesar 5 barg berubah menjadi 4,1–5,4 barg, sedangkan temperatur LPG normal 38 °C meningkat menjadi 39–42 °C.

Tabel 3. Parameter Operasi LPG Treating Unit

No	Parameter	Nilai Normal	Nilai Aktual	Indikasi
1	Tekanan LPG	8 barg	6,9–8,5 barg	Fluktuasi tekanan
2	Temperatur LPG	38 °C	39–42 °C	Deviasi termal ringan
3	Laju alir LPG	120 m ³ /jam	110–125 m ³ /jam	Ketidakstabilan aliran
4	Tekanan nitrogen	5 barg	4,1–5,4 barg	Ketidakseimbangan tekanan nitrogen

Sumber : Hasil Observasi (2026)

Deviasi tekanan LPG sebesar minus 1,1 barg hingga plus 0,5 barg dari nilai normal menunjukkan bahwa sistem mengalami fluktuasi yang cukup penting untuk ditelusuri. Deviasi laju alir LPG sebesar 110–125 m³/jam menunjukkan rentang perubahan minus 10 m³/jam sampai plus 5 m³/jam terhadap kondisi normal. Pada jalur nitrogen, deviasi tekanan sebesar 4,1–5,4 barg menunjukkan adanya ketidakseimbangan yang relevan dengan dugaan *passing nitrogen valve*. Dalam perspektif keselamatan proses, deviasi operasi semacam ini dapat menjadi indikator awal melemahnya fungsi *containment* dan *barrier* keselamatan, terutama ketika berlangsung berulang dan berkaitan dengan komponen yang sama [6], [7], [29].

c) Hasil Perhitungan Risiko FMEA

Perhitungan risiko dilakukan dengan mengalikan nilai *severity*, *occurrence*, dan *detection* untuk memperoleh nilai *Risk Priority Number*. Hasil FMEA menunjukkan bahwa *passing control valve* LPG memiliki nilai risiko tertinggi sebesar 336, diikuti *internal leakage* pada *ESD valve* sebesar 315, *passing nitrogen valve* sebesar 252, *seat leakage* pada *PSV* sebesar 160, dan *leakage flange connection* sebesar 100.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Risiko FMEA

No	Mode Kegagalan	S	O	D	RPN	Kategori	Prioritas
1	<i>Passing control valve</i> LPG	8	7	6	336	Tinggi	1
2	<i>Internal leakage</i> ESD valve	9	5	7	315	Tinggi	2
3	<i>Passing nitrogen valve</i>	7	6	6	252	Sedang	3
4	<i>Seat leakage</i> PSV	8	4	5	160	Sedang	4
5	<i>Leakage flange connection</i>	5	5	4	100	Rendah	5

Sumber : Olahan Data (2026)

Hasil tersebut menunjukkan bahwa dua mode kegagalan masuk kategori risiko tinggi, dua mode kegagalan masuk kategori sedang, dan satu mode kegagalan masuk kategori rendah. Persentase komposisi risiko menunjukkan bahwa 40% mode kegagalan berada pada kategori tinggi, 40% pada kategori sedang, dan 20% pada kategori rendah. Kondisi ini menegaskan bahwa risiko *internal leakage* pada LPG Treating Unit tidak tersebar merata, tetapi terkonsentrasi pada komponen yang memiliki fungsi kritis terhadap pengendalian aliran dan isolasi darurat.

d) Interpretasi Risiko Tinggi pada Control Valve LPG

Passing control valve LPG menjadi prioritas pertama dengan nilai RPN 336. Nilai ini berasal dari *severity* 8, *occurrence* 7, dan *detection* 6. Kombinasi tersebut menunjukkan bahwa kegagalan ini memiliki dampak serius, frekuensi relatif tinggi, dan kemampuan deteksi yang belum kuat. Secara teknis, *passing control valve* dapat menyebabkan aliran LPG melewati jalur yang tidak semestinya meskipun *valve* berada pada posisi tertutup atau seharusnya membatasi aliran. Dampak langsungnya adalah fluktuasi tekanan, kehilangan produk, dan penurunan kestabilan proses.

Temuan ini konsisten dengan Yusof dan Abdullah [25] yang menyatakan bahwa *seat* merupakan komponen kritis pada *valve* karena degradasi permukaan sealing dapat menurunkan kemampuan penutupan. Jia [11] juga menjelaskan bahwa goresan permukaan, keausan *seat ring*, korosi, dan partikel padat dapat membentuk celah kebocoran internal. Pada konteks LPG Treating Unit, implikasinya lebih luas karena *control valve* tidak hanya berfungsi sebagai pengatur aliran, tetapi juga menjaga keseimbangan tekanan proses. Dengan nilai RPN 336, tindakan mitigasi pada *control valve* harus diarahkan pada inspeksi *seat*, pemantauan tren tekanan, *predictive maintenance*, serta penggantian *seat valve* secara periodik.

e) Interpretasi Risiko Tinggi pada ESD Valve

Internal leakage pada ESD *valve* berada pada prioritas kedua dengan nilai RPN 315. Meskipun nilai *occurrence* lebih rendah dibandingkan *control valve*, nilai *severity* mencapai 9 dan *detection* 7. Artinya, kegagalan ini sangat kritis karena berhubungan dengan fungsi isolasi darurat. ESD *valve* seharusnya mampu menutup aliran secara cepat ketika terjadi kondisi abnormal. Ketika terjadi *internal leakage*, kemampuan sistem untuk mengisolasi sumber bahaya berkurang, sehingga potensi eskalasi skenario kecelakaan proses meningkat.

Hasil ini selaras dengan Schmitz et al. [7], yang menekankan bahwa status *barrier* keselamatan pada level skenario berpengaruh terhadap kemungkinan terjadinya kecelakaan besar. Sun et al. [29] juga menunjukkan bahwa penurunan performa *safety barrier* dapat mengurangi ketahanan sistem proses terhadap gangguan. Dalam penelitian ini, ESD *valve* memiliki risiko tinggi bukan semata karena frekuensi kejadian, melainkan karena konsekuensi kegagalannya terhadap fungsi proteksi. Maka, mitigasi pada ESD *valve* harus mencakup *function test* berkala, penggantian *seal* dan *packing*, verifikasi fungsi isolasi, serta evaluasi integritas sistem keselamatan.

f) Interpretasi Risiko Sedang pada Nitrogen Valve dan PSV

Passing nitrogen valve memiliki nilai RPN 252 dan masuk kategori risiko sedang. Mode kegagalan ini memiliki *severity* 7, *occurrence* 6, dan *detection* 6. Risiko utamanya berkaitan dengan ketidakseimbangan tekanan dan potensi kontaminasi jalur LPG. Nilai ini menunjukkan bahwa nitrogen *valve* tidak boleh dianggap sebagai komponen utilitas biasa karena interaksi antara nitrogen dan jalur

LPG dapat mempengaruhi kestabilan proses. Deviasi tekanan nitrogen dari 5 barg menjadi 4,1–5,4 barg memperkuat indikasi adanya gangguan pada jalur tersebut .

Seat leakage pada PSV memiliki nilai RPN 160. Meskipun frekuensinya lebih rendah, *severity* tetap tinggi karena PSV merupakan komponen proteksi tekanan lebih. Kuchekar, Sutar, dan Patil [22] menunjukkan bahwa kegagalan *pressure relief valve* dapat dipengaruhi oleh deposit, korosi, pengaturan tekanan, dan kondisi perawatan. Dalam penelitian ini, *seat leakage* pada PSV menurunkan efektivitas proteksi tekanan dan perlu ditangani melalui *overhaul*, pembersihan *seat*, dan pengujian *setting pressure*.

g) Interpretasi Risiko Rendah pada Flange Connection

Leakage flange connection memiliki nilai RPN 100 dan termasuk risiko rendah. Nilai ini berasal dari *severity* 5, *occurrence* 5, dan *detection* 4. Risiko pada komponen ini relatif lebih rendah karena indikasi kebocoran lebih mudah diamati melalui inspeksi visual, dan dampaknya pada data penelitian bersifat minor dibandingkan *valve* kritis. Namun, status risiko rendah tidak berarti dapat diabaikan. Pada sistem LPG, kebocoran kecil pada sambungan tetap berpotensi berkembang bila gasket mengalami degradasi berulang, pengencangan tidak merata, atau terdapat siklus tekanan dan temperatur. Dengan demikian, inspeksi visual rutin, *retightening*, dan penggantian gasket tetap diperlukan sebagai bagian dari pengendalian *pressure containment*.

h) Evaluasi Mitigasi dan Penurunan Risiko

Rekomendasi mitigasi disusun berdasarkan urutan prioritas RPN. Untuk *passing control valve* LPG, mitigasi utama berupa *predictive maintenance*, inspeksi *seat*, dan penggantian *seat valve* berkala. Untuk ESD *valve*, tindakan yang diperlukan meliputi *function test*, penggantian *seal* dan *packing*, serta verifikasi fungsi isolasi. Untuk nitrogen *valve*, mitigasi diarahkan pada inspeksi korosi, pemantauan tekanan, dan *chemical treatment*. Untuk PSV, tindakan berupa *overhaul*, pembersihan *seat*, dan uji *setting pressure*. Untuk *flange connection*, mitigasi dilakukan melalui penggantian gasket, *retightening*, dan inspeksi visual rutin .

Tabel 5. Perbandingan RPN Sebelum dan Sesudah Mitigasi

No	Mode Kegagalan	RPN		Penurunan	Persentase
		Awal	Setelah Mitigasi		
1	<i>Passing control valve</i> LPG	336	168	168	50,0%
2	<i>Internal leakage</i> ESD <i>valve</i>	315	140	175	55,6%
3	<i>Passing nitrogen valve</i>	252	120	132	52,4%
4	<i>Seat leakage</i> PSV	160	80	80	50,0%
5	<i>Leakage flange connection</i>	100	45	55	55,0%

Sumber : Olahan Data (2026)

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa skenario mitigasi mampu menurunkan RPN sebesar 50,0–55,6%. Penurunan terbesar terjadi pada *internal leakage* ESD *valve*, yaitu 55,6%, karena peningkatan *function test*, penggantian *seal* dan *packing*, serta verifikasi sistem isolasi diperkirakan mampu menurunkan kemungkinan kejadian dan meningkatkan kemampuan deteksi. Penurunan pada control *valve* sebesar 50,0% menunjukkan bahwa *predictive maintenance* dan penggantian *seat* dapat menekan risiko, tetapi efektivitasnya tetap bergantung pada konsistensi inspeksi dan kualitas data tren operasi.

Hasil penelitian ini memperkuat temuan terdahulu bahwa *valve* merupakan titik kritis dalam sistem fluida bertekanan. Yusof dan Abdullah [25] menemukan bahwa *seat* dan *packing* merupakan komponen dengan kontribusi besar terhadap kegagalan butterfly *valve*. Sotoodeh [26] menunjukkan bahwa *seat leakage* pada pipeline ball *valve* menjadi salah satu mode kegagalan penting pada sistem offshore. Jia [11] menjelaskan bahwa kebocoran internal pada ball *valve* banyak dipengaruhi oleh keausan, partikel, korosi, dan degradasi permukaan sealing. Hasil penelitian ini konsisten dengan kajian tersebut, tetapi memberikan penguatan spesifik pada LPG Treating Unit dengan memasukkan variabel operasi berupa tekanan LPG, laju alir LPG, tekanan nitrogen, fungsi ESD *valve*, dan proteksi PSV.

Dibandingkan dengan Maniram Kumar et al. [24] yang menerapkan fuzzy FMEA pada Auto LPG Dispensing Station, penelitian ini menggunakan FMEA konvensional tetapi menempatkan *internal leakage* sebagai fokus utama pada unit proses, bukan pada fasilitas distribusi LPG. Dibandingkan dengan Hassan et al. [33], yang mengembangkan modified FMEA untuk pipa petroleum lintas wilayah, penelitian ini lebih spesifik pada peralatan proses di LPG Treating Unit dan menghubungkan RPN dengan prioritas mitigasi teknis. Perbedaan ini menunjukkan bahwa kontribusi penelitian tidak berada pada pengembangan metode FMEA baru, melainkan pada penerapan empiris FMEA untuk memetakan risiko *internal leakage* secara lebih spesifik pada sistem *valve* dan *pressure containment* LPG Treating Unit.

i) Implikasi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa prioritas mitigasi harus diarahkan terlebih dahulu pada control *valve* LPG dan ESD *valve* karena keduanya memiliki RPN lebih dari 300. Control *valve* LPG menjadi prioritas karena mempengaruhi stabilitas tekanan dan kehilangan produk, sedangkan ESD *valve* menjadi prioritas karena mempengaruhi fungsi isolasi darurat. Nitrogen *valve* dan PSV tetap memerlukan perhatian karena keduanya berhubungan dengan keseimbangan tekanan dan proteksi sistem. *Flange connection* memiliki risiko terendah, tetapi tetap harus dimasukkan dalam program inspeksi karena LPG merupakan fluida mudah terbakar.

Hasil ini mendukung pandangan bahwa *internal leakage* harus dilihat sebagai degradasi *safety barrier*, bukan sekadar gangguan peralatan. Sistem industri proses memerlukan pendekatan keselamatan yang menghubungkan kegagalan teknis dengan potensi eskalasi bahaya. Pentingnya metode penilaian risiko yang mampu menghubungkan aspek keselamatan, keamanan proses, dan ketahanan sistem. Dengan demikian, penggunaan FMEA pada penelitian ini memberikan dasar kuantitatif untuk menentukan prioritas pemeliharaan berbasis risiko pada LPG Treating Unit.

j) Keterbatasan

Meskipun hasil penelitian menunjukkan prioritas risiko yang jelas, interpretasi penurunan RPN setelah mitigasi tetap harus dibatasi sebagai estimasi berbasis skenario teknis. Nilai pasc mitigasi perlu divalidasi menggunakan log DCS, laporan inspeksi, *work order maintenance*, *proof test* ESD *valve*, dan data operasi dalam periode yang lebih panjang. Pembatasan ini penting karena FMEA bersifat semi-kuantitatif dan dipengaruhi oleh kualitas data, penilaian ahli, serta konsistensi skala penilaian. Dengan validasi lanjutan, hasil penelitian dapat diperkuat menjadi dasar pengambilan keputusan pemeliharaan dan keselamatan proses yang lebih andal.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis risiko *internal leakage* pada LPG Treating Unit menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* berdasarkan data observasi lapangan, wawancara, histori gangguan, dan parameter operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *internal leakage* tidak hanya berkaitan dengan kebocoran fluida, tetapi juga mempengaruhi kestabilan tekanan, kehilangan produk, efektivitas isolasi darurat, dan keandalan *safety barrier* pada sistem proses. Lima mode kegagalan utama berhasil diidentifikasi, yaitu *passing control valve* LPG, *internal leakage* pada ESD *valve*, *passing nitrogen valve*, *seat leakage* pada PSV, dan *leakage flange connection*.

Hasil perhitungan FMEA menunjukkan bahwa *passing control valve* LPG memiliki tingkat risiko tertinggi dengan nilai RPN sebesar 336, diikuti *internal leakage* pada ESD *valve* sebesar 315. Kedua mode kegagalan tersebut dikategorikan sebagai risiko tinggi karena memiliki dampak signifikan terhadap kestabilan operasi dan keselamatan proses. *Passing nitrogen valve* dan *seat leakage* pada PSV termasuk kategori risiko sedang dengan nilai RPN masing-masing sebesar 252 dan 160, sedangkan *leakage flange connection* memiliki risiko terendah dengan nilai RPN sebesar 100. Temuan ini menunjukkan bahwa prioritas mitigasi harus diarahkan terlebih dahulu pada komponen yang berhubungan langsung dengan pengendalian aliran dan fungsi isolasi darurat.

Rekomendasi mitigasi yang dihasilkan dalam penelitian ini meliputi *predictive maintenance*, inspeksi berkala, penggantian *seat*, *seal*, dan *packing*, *function test* ESD *valve*, pemantauan korosi, serta *overhaul* PSV. Berdasarkan evaluasi skenario mitigasi, tindakan tersebut diperkirakan mampu

menurunkan nilai risiko sebesar 50,0–55,6%. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan FMEA dapat digunakan sebagai dasar penentuan prioritas pemeliharaan berbasis risiko pada LPG Treating Unit.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena sebagian evaluasi penurunan risiko dilakukan berdasarkan skenario teknis dan belum sepenuhnya divalidasi menggunakan log DCS kontinu, laporan inspeksi jangka panjang, *proof test* ESD valve, dan histori operasi multi-periode. Oleh sebab itu, penelitian selanjutnya disarankan mengintegrasikan data operasi real-time, histori *maintenance* jangka panjang, analisis tren DCS, serta pendekatan kuantitatif lanjutan seperti fuzzy FMEA, *dynamic risk assessment*, atau integrasi *process safety barrier analysis* untuk meningkatkan ketepatan prioritas risiko dan validasi efektivitas mitigasi pada LPG Treating Unit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak operasional dan pemeliharaan LPG Treating Unit yang telah memberikan dukungan data lapangan, fasilitas observasi, serta informasi teknis selama proses penelitian berlangsung. Apresiasi juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Industri Universitas PGRI Adi Buana Surabaya atas dukungan akademik dan fasilitas pendukung penelitian. Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus dari lembaga pendanaan pemerintah maupun institusi komersial.

REFERENCES

- [1] H. J. Qeshta, S. Abuyahya, P. Pal, and F. Banat, "Sweetening Liquefied Petroleum Gas (LPG): Parametric Sensitivity Analysis Using Aspen HYSYS," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 26, pp. 1011–1017, 2015, doi: 10.1016/j.jngse.2015.08.004.
- [2] A. Safari and M. Vesali-Naseh, "Design and Optimization of Hydrodesulfurization Process for Liquefied Petroleum Gases," *J. Clean. Prod.*, vol. 230, pp. 1155–1167, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.108.
- [3] J. Hernandez-Fernandez, H. Cano, and S. Rodriguez-Couto, "Quantification and Removal of Volatile Sulfur Compounds (VSCs) in Atmospheric Emissions in Large (Petro) Chemical Complexes in Different Countries of America and Europe," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, p. 11402, 2022, doi: 10.3390/su141811402.
- [4] D. A. Kinanti, M. A. Jumali, and M. A. Firmansyah, "Analisis Pengambilan Keputusan Pemilihan Negara Asal Impor Mesin dengan Metode TOPSIS Berdasarkan Data BPS 2018–2024," *J. Tek. Ind. Terintegrasi*, vol. 9, no. 1 SE-Articles of Research, pp. 433–439, Jan. 2026, doi: 10.31004/jutin.v9i1.52541.
- [5] D. A. Crowl and J. F. Louvar, *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. Pearson Education, 2019.
- [6] F. Dweiri, S. Kumar, S. A. Khan, and V. Jain, "Designing an integrated AHP based decision support system for supplier selection in automotive industry," *Expert Syst. Appl.*, vol. 62, pp. 273–283, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.06.030.
- [7] P. Schmitz, P. Swuste, G. Reniers, and K. van Nunen, "Predicting Major Accidents in the Process Industry Based on the Barrier Status at Scenario Level: A Practical Approach," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 71, p. 104519, 2021, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104519.
- [8] P. Swuste, J. Theunissen, P. Schmitz, G. Reniers, and P. Blokland, "Process Safety Indicators, a Review of Literature," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 40, pp. 162–173, 2016, doi: 10.1016/j.jlp.2015.12.020.
- [9] M. A. Jumali, Gilang Nanda Dwy Pradana, and Rusdiyantoro, "Analisis Beban Kerja Karyawan Di Departemen Maintenance Pada Perusahaan Bumbu Di Gresik," *Ind. Inov. J. Tek. Ind.*, vol. 15, no. 1, pp. 201–205, 2025, doi: 10.36040/industri.v15i1.13292.
- [10] Y. Jia *et al.*, "Analysis and Prevention of Internal Leakage of Ball Valve in Oil and Gas Pipeline," *Int. Core J. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 255–264, 2022.
- [11] Y. Jia, "Analysis and Prevention of Internal Leakage of Ball Valve," *Int. Core J. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 255–264, 2022, doi: 10.6919/ICJE.202202_8(2).0032.
- [12] M. Shi, Z. Cao, and T. Ye, "Internal Leakage Rate Prediction and Failure Diagnosis of Buried Pipeline Ball Valve Based on Valve Cavity Pressure Detection," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 89, p. 102303, 2023, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2022.102303.
- [13] D. Zheng *et al.*, "Review of Acoustic Emission Detection Technology for Valve Internal Leakage: Mechanisms, Methods, Challenges, and Application Prospects," *Sensors*, vol. 25, no. 14, p. 4487, 2025, doi: 10.3390/s25144487.
- [14] I. Mustapha *et al.*, "Investigation of Internal Gas Leakage on the Gate Valve Using Acoustic Signal," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 57–65, 2022, [Online]. Available: <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/7494>

- [15] G. Ye, K. Xu, and W. Wu, "Mixed Multiple-Variable Modelling of Acoustic Emission Signals for Valve Internal Leakage Detection," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 487–498, 2021, doi: 10.1049/smt2.12049.
- [16] M. A. Jumali, "OPTIMIZATION TO MINIMIZING DISTANCE CARS OF FIRE EXPORTER IN INDUSTRIAL REGION SIER SURABAYA," *Tibuna*, vol. 1, no. 1, pp. 61–68, 2018.
- [17] M. Setiyo, *Teknologi Kendaraan Berbahan Bakar LPG*. Deepublish, 2019.
- [18] S. Sembiring, R. L. Panjaitan, S. Susianto, and A. Altway, "Pemanfaatan Gas Alam sebagai LPG (Liquified Petroleum Gas)," *J. Tek. ITS*, vol. 8, no. 2, 2020, doi: 10.12962/j23373539.v8i2.47079.
- [19] V. K. Sharma, "Liquefied Petroleum Gas: A Comprehensive Review of Its Manufacturing and Refining Routes," *Prog. Petrochemical Sci.*, vol. 7, no. 2, 2025, doi: 10.31031/PPS.2025.07.000656.
- [20] G. Popov, B. K. Lyon, and B. D. Hollcroft, *Risk Assessment: A Practical Guide to Assessing Operational Risks*. Wiley, 2022.
- [21] A. Carro, A. Gonzalez, and G. Caceres, "FMEA and Risk Assessment for Thermochemical Energy Storage Systems," *Energies*, vol. 14, no. 19, p. 6013, 2021, doi: 10.3390/en14196013.
- [22] P. Kuchekar, R. Sutar, and P. Patil, "Assessing the Critical Factors Leading to the Failure of Pressure Relief Valves: A Case Study," *Processes*, vol. 12, no. 11, p. 820, 2024, doi: 10.3390/pr121100820.
- [23] S. Hassan, J. Wang, C. Kontovas, and M. Bashir, "Modified FMEA Hazard Identification for Cross-Country Petroleum Pipeline Using Fuzzy Rule Base and Approximate Reasoning," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 74, p. 104616, 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104616.
- [24] A. Maniram Kumar, S. Rajakarunakaran, P. Pitchipoo, and R. Vimalasan, "Fuzzy Based Risk Prioritisation in an Auto LPG Dispensing Station," *Saf. Sci.*, vol. 101, pp. 231–247, 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.09.011.
- [25] M. A. Bin Yusof and N. H. B. Abdullah, "Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of Butterfly Valve in Oil and Gas Industry," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 9, pp. 9–19, 2016.
- [26] K. Sotoodeh, "Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of Pipeline Ball Valves in the Offshore Industry," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 20, no. 4, pp. 1175–1183, 2020, doi: 10.1007/s11668-020-00919-8.
- [27] M. P. Broadribb, "Under Investigation; Wanted, Missing Risk-Based Process Safety Elements," *Process Saf. Prog.*, vol. 41, no. 4, pp. 678–686, 2022, doi: 10.1002/prs.12393.
- [28] M. S. Ab Rahim, G. Reniers, M. Yang, and S. Bajpai, "Risk Assessment Methods for Process Safety, Process Security and Resilience in the Chemical Process Industry: A Thorough Literature Review," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 88, p. 105274, 2024, doi: 10.1016/j.jlp.2024.105274.
- [29] H. Sun, H. Wang, M. Yang, and G. Reniers, "Resilience-Based Approach to Safety Barrier Performance Assessment in Process Facilities," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 73, p. 104599, 2021, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104599.
- [30] J. Zhang, H. Ren, H. Ren, Y. Chai, Z. Liu, and X. Liang, "Comprehensive Review of Safety Studies in Process Industrial Systems: Concepts, Progress, and Main Research Topics," *Processes*, vol. 11, no. 8, p. 2454, 2023, doi: 10.3390/pr11082454.
- [31] I. O. for Standardization, "ISO 31010:2019 Risk Management: Risk Assessment Techniques." International Organization for Standardization, 2019.
- [32] ANSI/ASSP, "ANSI/ASSP Z590.3-2021 Prevention Through Design: Guidelines for Addressing Occupational Hazards and Risks in Design and Redesign Processes." American Society of Safety Professionals, 2021.
- [33] S. M. Hassan, M. S. Rashid, A. R. Muhaimeed, N. S. Madlul, M. U. Al-Katib, and M. A. Sulaiman, "Effect of new filtration medias on water quality, biomass, blood parameters and plasma biochemistry of common carp (*Cyprinus carpio*) in RAS," *Aquaculture*, vol. 548, p. 737630, 2022.