



Analisis Risiko Overpressure pada Propylene Recovery Unit dengan FMEA

Rizal Fawzi¹, Manik Ayu Titisari², Arief Triatmaja Permana Sadewa³, Muhamad Abdul Jumali^{4*}

^{1,2,3,4} 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:

overpressure;

Propylene Recovery Unit;

FMEA;

Risk Priority Number;

keselamatan proses

Keywords:

overpressure;

Propylene Recovery Unit;

FMEA;

Risk Priority Number;

process safety

ABSTRAK

Propylene Recovery Unit (PRU) memiliki risiko overpressure akibat gangguan kontrol proses, kegagalan instrumentasi, kerusakan sistem proteksi tekanan, dan human error. Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko overpressure pada PRU menggunakan Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Data diperoleh melalui observasi proses, studi literatur, dan penilaian severity, occurrence, serta detection pada komponen kritis. Delapan failure mode diidentifikasi, yaitu tekanan kolom distilasi tidak terkontrol, PRV/PSV stuck, pressure transmitter error, control valve stuck, kebocoran pipa bertekanan, heat exchanger fouling, kegagalan HIPPS, dan human error operasi. Hasil menunjukkan bahwa human error operasi memiliki RPN tertinggi sebesar 280, diikuti pressure transmitter error sebesar 245, PRV/PSV stuck sebesar 240, dan control valve stuck sebesar 240. Temuan ini menunjukkan bahwa risiko overpressure dipengaruhi oleh kombinasi faktor manusia, instrumentasi, proteksi tekanan, dan kontrol proses. Rekomendasi mitigasi diarahkan pada pelatihan operator, kalibrasi instrumentasi, pengujian PRV/PSV, dan perbaikan control valve.

ABSTRACT

The Propylene Recovery Unit (PRU) is exposed to overpressure risk caused by process control disturbances, instrumentation failures, pressure protection failures, and human error. This study aimed to analyze overpressure risk in a PRU using Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Data were obtained through process observation, literature review, and severity, occurrence, and detection assessment of critical components. Eight failure modes were identified: uncontrolled distillation column pressure, stuck PRV/PSV, pressure transmitter error, stuck control valve, pressurized pipe leakage, heat exchanger fouling, HIPPS failure, and operational human error. The results showed that operational human error had the highest RPN of 280, followed by pressure transmitter error with 245, stuck PRV/PSV with 240, and stuck control valve with 240. These findings indicate that overpressure risk is influenced by human factors, instrumentation reliability, pressure protection, and process control performance. Recommended mitigations include operator training, instrumentation calibration, PRV/PSV testing, and control valve improvement.

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

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

I. PENDAHULUAN

Propylene Recovery Unit (PRU) bekerja sebagai unit pemisahan fraksi C3/C4 yang menghasilkan propylene dengan kemurnian tinggi melalui rangkaian kolom, heat exchanger, pompa, sistem kontrol, dan perangkat proteksi tekanan. Operasi unit ini sangat bergantung pada kestabilan tekanan karena propylene berada dalam sistem hidrokarbon ringan yang mudah terbakar, bertekanan, dan sensitif terhadap perubahan temperatur, laju alir, serta respons instrumentasi. Ketika tekanan proses tidak terkendali, deviasi tersebut dapat berkembang menjadi overpressure yang menurunkan kestabilan

*Corresponding author.

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

operasi, mendorong pelepasan produk ke *flare system*, merusak peralatan, dan meningkatkan potensi *loss of containment*. *High pressure failure* dijelaskan sebagai kondisi ketika tekanan pada PRU melampaui batas aman operasi dan berpotensi menyebabkan kerusakan peralatan, kebocoran, atau kecelakaan proses. Posisi PRU sebagai unit penghasil *propylene high purity* juga membuat gangguan tekanan tidak hanya berdampak pada keselamatan, tetapi juga pada kontinuitas produksi dan efisiensi pemulihan produk.

Overpressure pada sistem proses jarang berdiri sebagai kejadian tunggal. Kondisi tersebut biasanya terbentuk dari rangkaian kegagalan teknis dan operasional, seperti tekanan kolom yang tidak terkendali, *pressure relief valve* yang gagal membuka, transmitter yang membaca tekanan secara tidak akurat, *control valve yang stuck*, *fouling* pada *heat exchanger*, kebocoran pipa bertekanan, kegagalan HIPPS, atau keterlambatan respon operator. Kajian keselamatan proses mutakhir menempatkan kecelakaan industri sebagai hasil interaksi antara kegagalan komponen, abnormalitas operasi, dan penurunan fungsi proteksi sistem, bukan hanya akibat kerusakan peralatan tunggal [1], [2]. Pada sistem bertekanan, keandalan *barrier* menjadi penentu penting karena status *barrier* dapat menunjukkan perkembangan skenario kecelakaan dan kemungkinan terjadinya *central event* [3]–[5]. Pandangan ini relevan dengan PRU karena sistem proteksi tekanan, kontrol proses, dan tindakan operator bekerja sebagai lapisan pengendalian yang saling terkait.

Beberapa penelitian dalam sepuluh tahun terakhir telah memberikan dasar penting untuk membaca risiko *overpressure* pada fasilitas proses. Kajian *risk assessment* pada industri kimia menunjukkan bahwa metode penilaian risiko perlu menangkap keterkaitan antara keselamatan proses, keamanan operasi, dan ketahanan sistem terhadap gangguan [6]–[8]. Pada *pressure relief valve*, kegagalan fungsi dapat dipengaruhi oleh kondisi mekanis, deposit, korosi, pengaturan tekanan, kualitas inspeksi, dan efektivitas perawatan [9]–[11]. Studi lain tentang *valve* dan *pipeline* menunjukkan bahwa *seat leakage*, *internal leakage*, degradasi *seal*, erosi, korosi, partikel pada *seat*, dan gangguan sinyal dapat melemahkan fungsi isolasi serta mengubah respon tekanan sistem [12]–[14]. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa analisis risiko pada sistem bertekanan perlu diturunkan sampai ke *level failure mode* agar hubungan antara penyebab, dampak, kemampuan deteksi, dan prioritas tindakan dapat terlihat secara terukur.

Pendekatan tersebut menjadi lebih penting karena sumber risiko tersebar pada subsistem yang berbeda. Kolom distilasi berhubungan dengan kestabilan tekanan dan temperatur. PRV/PSV berfungsi sebagai proteksi terhadap akumulasi tekanan. *Pressure* transmitter menentukan ketepatan sinyal untuk sistem kontrol. *Control valve* mengatur aliran *propylene* agar tidak terjadi penumpukan tekanan. *Heat exchanger* mempengaruhi pelepasan panas dan potensi kenaikan tekanan. HIPPS menjadi *barrier* akhir ketika proteksi lain tidak cukup. Operator berperan membaca alarm, menjalankan prosedur, dan mengambil respon korektif pada kondisi abnormal. Penelitian ini juga mengarahkan analisis pada komponen utama penyebab *high pressure failure*, terutama instrumentasi dan sistem operasi, dengan risiko kegagalan diukur melalui *Risk Priority Number* hasil FMEA[15], [16].

Kajian terdahulu mengenai *pressure relief device*, *valve leakage*, *pipeline risk*, *LPG facility*, dan *risk-based inspection* telah menjelaskan kegagalan komponen pada fasilitas proses secara cukup luas. Akan tetapi, pembahasan yang menempatkan PRU sebagai sistem operasi terintegrasi masih terbatas, terutama ketika mode kegagalan instrumentasi, kontrol tekanan, proteksi tekanan, *heat transfer*, perpipaan, HIPPS, dan *human factor* harus dibandingkan dalam satu ukuran prioritas risiko. Pendekatan *Bow-Tie* mampu menggambarkan hubungan ancaman, *barrier*, dan konsekuensi, sedangkan RBI/API 581 kuat untuk menentukan risiko dan interval inspeksi peralatan. Keduanya belum secara langsung menunjukkan urutan mode kegagalan PRU berdasarkan *severity*, *occurrence*, *detection*, dan RPN. Risiko *overpressure* dibaca melalui struktur FMEA agar setiap *failure mode* dapat dibandingkan secara kuantitatif menurut dampak, peluang kejadian, dan kemampuan deteksinya[17], [18].

Failure Mode and Effects Analysis digunakan karena sesuai dengan karakter masalah yang membutuhkan pemetaan kegagalan pada level komponen dan proses. *Severity* menunjukkan besarnya dampak kegagalan terhadap keselamatan, peralatan, produksi, dan lingkungan. *Occurrence* menunjukkan peluang atau kecenderungan kegagalan muncul dalam operasi. *Detection* menunjukkan kemampuan sistem kontrol, alarm, inspeksi, dan operator dalam mengenali kegagalan sebelum berkembang menjadi kondisi berbahaya. Perkalian ketiga parameter tersebut menghasilkan *Risk Priority Number* yang menjadi dasar pengurutan risiko. Dengan struktur ini, FMEA tidak hanya mengidentifikasi daftar kegagalan, tetapi juga memberi dasar kuantitatif untuk menentukan mode kegagalan mana yang

perlu diprioritaskan dalam pengendalian risiko[19], [20].

Penelitian ini menganalisis risiko *overpressure* pada *Propylene Recovery Unit* menggunakan FMEA dengan fokus pada delapan *failure mode* kritis, yaitu tekanan kolom distilasi tidak terkontrol, PRV/PSV *stuck*, *pressure transmitter error*, *control valve stuck*, kebocoran pipa bertekanan, *heat exchanger fouling*, HIPPS gagal berfungsi, dan *human error* operasi. Analisis diarahkan untuk menjawab kebutuhan teknis: *failure mode* apa yang paling kritis, bagaimana tingkat risikonya berdasarkan *severity*, *occurrence*, dan *detection*, serta tindakan mitigasi apa yang paling logis disusun berdasarkan urutan RPN. Dengan cara ini, rekomendasi mitigasi tidak diletakkan sebagai klaim keberhasilan implementasi, tetapi sebagai hasil prioritasasi risiko yang diturunkan dari karakter kegagalan PRU[21], [22].

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk menganalisis risiko *overpressure* pada *Propylene Recovery Unit* (PRU) menggunakan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Pendekatan ini dipilih karena FMEA mampu mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab kegagalan, dampak sistem, kemampuan deteksi, serta prioritas risiko melalui parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection* [23], [24]. Dalam sistem proses hidrokarbon, pendekatan berbasis FMEA digunakan ketika risiko tidak hanya dipengaruhi oleh konsekuensi kegagalan, tetapi juga oleh probabilitas kejadian dan efektivitas deteksi sebelum kondisi berkembang menjadi skenario kecelakaan proses [25], [26]. Penggunaan FMEA pada penelitian ini diarahkan untuk membaca hubungan antara kegagalan instrumentasi, kontrol tekanan, *pressure protection system*, dan human factor terhadap pembentukan kondisi *overpressure* pada PRU.

Objek penelitian difokuskan pada subsistem PRU yang berkaitan langsung dengan kestabilan tekanan proses dan fungsi *pressure containment*, yaitu kolom distilasi, *pressure transmitter*, *control valve*, *pressure relief valve/pressure safety valve* (PRV/PSV), *heat exchanger*, pipa bertekanan, *High Integrity Pressure Protection System* (HIPPS), dan operator proses. Pemilihan objek dilakukan secara *purposive* karena komponen tersebut memiliki hubungan langsung dengan pengendalian tekanan, pelepasan tekanan lebih, perpindahan panas, stabilitas aliran, serta respon operasi ketika terjadi *abnormal condition*. Pada sistem hidrokarbon bertekanan, kegagalan komponen-komponen tersebut dapat menyebabkan *pressure excursion*, *loss of containment*, dan pelemahan *safety barrier* [27], [28]. Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi proses, identifikasi kondisi operasi, serta diskusi teknis dengan operator, teknisi, dan *personel maintenance*. Data sekunder meliputi histori gangguan operasi, dokumen teknis, catatan inspeksi, parameter operasi, dan referensi keselamatan proses. Kombinasi observasi lapangan dan histori operasi diperlukan karena beberapa mode kegagalan pada sistem tekanan tinggi tidak selalu tampak secara visual dan sering ditunjukkan melalui deviasi tekanan, perubahan aliran, alarm proses, keterlambatan respon kontrol, atau penurunan performa instrumentasi [13], [29]. Penggunaan histori gangguan dan data operasi juga penting untuk mengurangi subjektivitas dalam penilaian *occurrence* dan *detection* pada FMEA [15], [30].

Variabel penelitian terdiri atas variabel penyebab, variabel penilaian risiko, dan variabel keluaran. Variabel penyebab mencakup kegagalan instrumentasi, *valve stuck*, *fouling heat exchanger*, kebocoran pipa, kegagalan sistem proteksi tekanan, dan *human error* operasi. Variabel penilaian risiko terdiri atas *severity*, *occurrence*, dan *detection*. *Severity* menunjukkan tingkat dampak kegagalan terhadap keselamatan proses, kerusakan peralatan, kestabilan operasi, dan kehilangan produk. *Occurrence* menunjukkan peluang atau kecenderungan kegagalan muncul berdasarkan kondisi operasi dan histori gangguan. *Detection* menunjukkan kemampuan sistem kontrol, alarm, inspeksi, dan operator dalam mengenali kegagalan sebelum berkembang menjadi kondisi berbahaya [23], [31]. Variabel keluaran berupa nilai *Risk Priority Number* (RPN), kategori risiko, urutan prioritas, dan rekomendasi mitigasi.

Penilaian *severity*, *occurrence*, dan *detection* menggunakan skala 1–10 sebagaimana umum diterapkan pada FMEA industri proses dan sistem keselamatan teknik [9], [16]. Nilai *severity* yang lebih tinggi menunjukkan konsekuensi yang lebih besar terhadap keselamatan dan operasi. Nilai *occurrence* yang lebih tinggi menunjukkan probabilitas kegagalan yang lebih sering, sedangkan nilai *detection* yang lebih tinggi menunjukkan kelemahan sistem dalam mendeteksi kegagalan. 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 mengurutkan *failure mode* dari tingkat risiko tertinggi sampai terendah. Pendekatan prioritisasi ini digunakan secara luas pada analisis *valve failure*, *pressure relief system*, *pipeline risk*, dan *process safety assessment* karena mampu menunjukkan mode kegagalan yang paling kritis terhadap operasi sistem [12], [32], [33].

Tahapan penelitian dilakukan secara berurutan. Tahap pertama adalah pemetaan proses PRU untuk menentukan subsistem yang berhubungan dengan tekanan operasi. Tahap kedua adalah identifikasi *failure mode* berdasarkan observasi lapangan, histori gangguan, dokumen operasi, dan referensi teknis. Tahap ketiga adalah penilaian *severity*, *occurrence*, dan *detection* untuk setiap *failure mode*. Tahap keempat adalah perhitungan dan pengurutan nilai RPN. Tahap kelima adalah interpretasi prioritas risiko dan penyusunan rekomendasi mitigasi berdasarkan karakter kegagalan dominan. Struktur analisis ini digunakan agar hubungan antara penyebab kegagalan, dampak sistem, kemampuan deteksi, dan prioritas pengendalian dapat dibaca secara kuantitatif dan konsisten.

Kategori risiko ditentukan berdasarkan interval nilai RPN untuk mempermudah interpretasi prioritas mitigasi. Risiko sangat tinggi ditetapkan untuk RPN lebih dari 200, risiko tinggi untuk RPN 100–200, risiko sedang untuk RPN 50–100, dan risiko rendah untuk RPN kurang dari 50. Klasifikasi ini digunakan agar *failure mode* dengan konsekuensi tinggi, probabilitas besar, dan kemampuan deteksi rendah memperoleh prioritas penanganan lebih awal. Dengan pendekatan tersebut, hasil FMEA tidak berhenti pada identifikasi kegagalan, tetapi menghasilkan dasar teknis untuk prioritas mitigasi risiko *overpressure* pada PRU.

Tahapan analisis FMEA pada penelitian ini tidak hanya digunakan untuk mengidentifikasi *failure mode*, tetapi juga untuk membaca hubungan antara penyebab kegagalan, konsekuensi operasi, kemampuan deteksi sistem, dan prioritas mitigasi secara kuantitatif. Struktur tersebut penting karena risiko *overpressure* pada PRU berkembang melalui interaksi beberapa subsistem yang bekerja secara simultan, mulai dari kontrol tekanan, instrumentasi, *pressure protection system*, perpindahan panas, integritas perpipaan, hingga respon operator. Pada sistem proses bertekanan, satu kegagalan kecil pada transmitter, *valve*, atau *heat exchanger* dapat mengubah kestabilan tekanan dan memicu kegagalan lanjutan apabila sistem proteksi tidak mendeteksi deviasi secara tepat waktu.

Penilaian *severity*, *occurrence*, dan *detection* disusun untuk memastikan bahwa setiap mode kegagalan dinilai dari tiga sisi yang berbeda. *Severity* digunakan untuk mengukur dampak kegagalan terhadap keselamatan proses, kerusakan peralatan, gangguan operasi, dan potensi kehilangan produk. *Occurrence* digunakan untuk membaca kecenderungan kegagalan muncul berdasarkan histori gangguan, kondisi operasi, dan informasi teknis dari personel operasi maupun *maintenance*. *Detection* digunakan untuk menilai kemampuan sistem kontrol, alarm, inspeksi, serta operator dalam mengenali kegagalan sebelum tekanan berkembang menjadi kondisi berbahaya. Dengan cara ini, *failure mode* yang jarang terjadi tetap dapat menjadi prioritas apabila memiliki dampak besar dan kemampuan deteksi yang lemah.

RPN digunakan sebagai ukuran prioritas karena mampu menggabungkan dampak, peluang kejadian, dan kemampuan deteksi dalam satu nilai numerik. Penggunaan RPN membantu membedakan mode kegagalan yang tampak serupa tetapi memiliki tingkat risiko berbeda. Seperti, kegagalan PRV/PSV dan *pressure transmitter* sama-sama berkaitan dengan pengendalian tekanan, tetapi keduanya memiliki karakter risiko yang berbeda. PRV/PSV berhubungan langsung dengan pelepasan tekanan lebih, sedangkan *pressure transmitter* mempengaruhi kualitas sinyal yang diterima sistem kontrol. Perbedaan fungsi tersebut perlu direpresentasikan dalam parameter FMEA agar prioritas mitigasi tidak disusun secara umum.

Variabel penelitian kemudian dibagi menjadi variabel penyebab, variabel penilaian, dan variabel keluaran. Variabel penyebab menjelaskan sumber kegagalan teknis atau operasional. Variabel penilaian digunakan untuk menghitung tingkat risiko melalui *severity*, *occurrence*, dan *detection*. Variabel keluaran menunjukkan hasil akhir analisis berupa RPN, kategori risiko, urutan prioritas, dan rekomendasi mitigasi. Pembagian ini menjaga konsistensi antara tujuan penelitian, metode, dan hasil yang akan dibahas. Hasil FMEA tidak berhenti sebagai daftar kegagalan, tetapi menjadi dasar teknis

untuk menentukan mode kegagalan yang perlu ditangani lebih awal. Variabel dan parameter penilaian yang digunakan dalam Berikut adalah penjelasan variabel dan parameter penilaian FMEA :

Tabel 1. Variabel dan Parameter Penilaian FMEA

Variabel	Parameter	Definisi Operasional	Skala Penilaian	Sumber Data
<i>Failure mode</i>	Mode kegagalan	Bentuk kegagalan yang berpotensi menyebabkan kondisi overpressure pada PRU	Deskriptif	Observasi, histori gangguan, diskusi teknis
Penyebab kegagalan	Penyebab potensial	Faktor teknis atau operasional yang memicu kegagalan sistem Konsekuensi kegagalan	Deskriptif	Dokumen operasi, inspeksi, wawancara
Dampak kegagalan	Efek sistem	terhadap tekanan, keselamatan proses, operasi, dan peralatan Tingkat dampak kegagalan terhadap keselamatan	Deskriptif	Observasi proses dan literatur teknis
<i>Severity (S)</i>	Tingkat keparahan	proses, stabilitas operasi, dan kerusakan peralatan Kemungkinan	1–10	Penilaian ahli dan referensi FMEA
<i>Occurrence (O)</i>	Tingkat kejadian	atau frekuensi kegagalan terjadi selama operasi	1–10	Histori gangguan dan observasi operasi
<i>Detection (D)</i>	Kemampuan deteksi	Kemampuan sistem kontrol, alarm, inspeksi, dan operator dalam mendeteksi kegagalan	1–10	Sistem monitoring dan evaluasi operasi
<i>Risk Priority Number (RPN)</i>	Nilai risiko	Hasil perkalian <i>severity</i> , <i>occurrence</i> , dan <i>detection</i>	1–1000	Perhitungan FMEA
Kategori risiko	Tingkat prioritas	Klasifikasi tingkat risiko berdasarkan interval nilai RPN	Rendah–Sangat Tinggi	Hasil analisis
Prioritas mitigasi	Prioritas tindakan	Urutan tindakan pengendalian berdasarkan nilai RPN tertinggi	Ranking	Hasil prioritisasi FMEA

Sumber: Hasil Survei dan Olahan Penelitian (2026)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Identifikasi Failure Mode pada Propylene Recovery Unit

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa risiko *overpressure* pada *Propylene Recovery Unit* berasal dari interaksi kegagalan instrumentasi, kontrol tekanan, *pressure protection system*, perpindahan panas, dan faktor operator. Berdasarkan observasi proses, histori gangguan, serta evaluasi sistem

operasi, delapan *failure mode* utama berhasil diidentifikasi, yaitu tekanan kolom distilasi tidak terkontrol, PRV/PSV *stuck*, *pressure transmitter error*, *control valve stuck*, kebocoran pipa bertekanan, *heat exchanger fouling*, kegagalan HIPPS, dan *human error* operasi. *Failure mode* tersebut memiliki hubungan langsung dengan kestabilan tekanan proses karena mempengaruhi kemampuan sistem dalam mengendalikan tekanan, mendeteksi deviasi operasi, atau melepaskan tekanan berlebih ketika terjadi *abnormal condition*.

Tekanan kolom distilasi yang tidak terkendali berpotensi menyebabkan akumulasi tekanan akibat ketidakseimbangan temperatur, aliran, dan performa sistem kontrol. PRV/PSV *stuck* menyebabkan tekanan lebih tidak dapat dilepas sesuai kapasitas desain sistem proteksi tekanan. *Pressure transmitter error* mempengaruhi akurasi pembacaan tekanan sehingga kontrol proses dapat memberikan respon yang tidak sesuai kondisi aktual. *Control valve stuck* menyebabkan gangguan pengaturan aliran *propylene* dan meningkatkan kemungkinan *pressure fluctuation*. *Heat exchanger fouling* menurunkan efektivitas perpindahan panas sehingga temperatur dan tekanan proses meningkat secara gradual. Kebocoran pipa bertekanan menyebabkan kehilangan *containment* dan penurunan integritas sistem tekanan. HIPPS *failure* menurunkan kemampuan *barrier* akhir dalam mengisolasi tekanan berlebih, sedangkan *human error* operasi berkaitan dengan keterlambatan respon alarm, kesalahan pengaturan operasi, dan ketidaksesuaian prosedur operasi.

Tabel 2. Failure Mode, Penyebab, dan Dampak Sistem pada PRU

No	Komponen	Failure Mode	Penyebab Utama	Dampak Sistem
1	Kolom distilasi	Tekanan tidak terkendali	Gangguan kontrol tekanan dan ketidakseimbangan operasi	<i>Overpressure</i> dan ketidakstabilan proses
2	PRV/PSV	<i>Stuck valve</i>	Deposit, korosi, dan kegagalan mekanis	Tekanan lebih tidak terlepas
3	<i>Pressure transmitter</i>	<i>Error</i> pembacaan	<i>Drift sensor</i> dan gangguan sinyal	Kesalahan kontrol tekanan
4	<i>Control valve</i>	<i>Stuck valve</i>	Keausan aktuator dan deposit	Gangguan aliran <i>propylene</i>
5	Pipa bertekanan	Kebocoran	Korosi dan degradasi material	<i>Loss of containment</i>
6	<i>Heat exchanger</i>	<i>Fouling</i>	Deposit fluida proses	Kenaikan temperatur dan tekanan
7	HIPPS	Gagal berfungsi	Kegagalan sistem <i>shutdown</i>	Penurunan efektivitas <i>barrier</i>
8	Operasi	<i>Human error</i>	Kesalahan respon operator	Keterlambatan penanganan <i>abnormal condition</i>

Sumber: Hasil Observasi dan Olahan Data (2026)

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa sumber risiko *overpressure* tidak terkonsentrasi pada satu komponen tunggal, tetapi tersebar pada subsistem yang memiliki fungsi berbeda dalam menjaga kestabilan tekanan. Temuan ini memperlihatkan bahwa risiko *overpressure* pada PRU berkembang melalui kombinasi gangguan kontrol proses, penurunan performa *pressure protection system*, degradasi instrumentasi, dan faktor manusia. Kondisi tersebut sejalan dengan pendekatan *process safety modern* yang menempatkan kecelakaan proses sebagai hasil interaksi antar *barrier* dan kegagalan sistem operasi [4], [34].

b. Hasil Penilaian Risiko FMEA

Penilaian risiko dilakukan menggunakan parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection* untuk menentukan nilai *Risk Priority Number* (RPN) pada setiap *failure mode*. *Severity* menunjukkan tingkat dampak kegagalan terhadap keselamatan proses dan operasi. *Occurrence* menunjukkan peluang kegagalan terjadi selama operasi PRU, sedangkan *detection* menunjukkan kemampuan sistem mendeteksi kegagalan sebelum berkembang menjadi kondisi kritis.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *human error* operasi memiliki nilai RPN tertinggi sebesar 280. Nilai tersebut diperoleh dari kombinasi *severity* tinggi, frekuensi kejadian yang relatif besar, dan kemampuan deteksi yang masih terbatas. *Pressure transmitter error* memiliki nilai RPN sebesar 245 karena kesalahan pembacaan tekanan dapat menyebabkan kontrol proses memberikan respon yang tidak sesuai kondisi aktual. PRV/PSV *stuck* dan *control valve stuck* masing-masing

memiliki nilai RPN sebesar 240 karena kedua komponen tersebut berhubungan langsung dengan pengendalian dan pelepasan tekanan proses.

Tabel 3. Hasil Penilaian Risiko FMEA pada PRU

No	Failure Mode	S	O	D	RPN	Kategori	Prioritas
1	Human error operasi	8	7	5	280	Sangat Tinggi	1
2	Pressure transmitter error	7	7	5	245	Sangat Tinggi	2
3	PRV/PSV stuck	8	5	6	240	Sangat Tinggi	3
4	Control valve stuck	8	5	6	240	Sangat Tinggi	4
5	Tekanan kolom tidak terkendali	7	5	5	175	Tinggi	5
6	HIPPS gagal berfungsi	9	4	4	144	Tinggi	6
7	Heat exchanger fouling	6	4	5	120	Tinggi	7
8	Kebocoran pipa bertekanan	7	3	4	84	Sedang	8

Sumber: Hasil Observasi dan Olahan Data (2026)

Nilai RPN menunjukkan bahwa risiko *overpressure* pada PRU lebih dominan dipengaruhi oleh faktor operasi dan instrumentasi dibandingkan kerusakan *containment* secara langsung. *Human error* menjadi prioritas tertinggi karena operator berperan dalam membaca alarm, mengendalikan parameter operasi, dan mengambil tindakan ketika terjadi deviasi tekanan. Temuan ini memperlihatkan bahwa penguatan *process safety* tidak hanya bergantung pada integritas peralatan, tetapi juga pada kualitas respon operasi dan efektivitas sistem kontrol. Kondisi tersebut konsisten dengan penelitian Ab Rahim et al. [6] yang menunjukkan bahwa risiko pada industri proses terbentuk dari hubungan antara faktor teknis, sistem pengendalian, dan ketahanan operasi terhadap gangguan.

Pressure transmitter error menjadi risiko dominan kedua karena akurasi instrumentasi menentukan kestabilan kontrol tekanan. Ketika transmitter membaca tekanan secara tidak tepat, sistem kontrol dapat membuka atau menutup *control valve* pada kondisi yang tidak sesuai. Temuan ini sejalan dengan penelitian Shi et al. [13] dan Ye et al. [29] yang menunjukkan bahwa gangguan sinyal dan penurunan kualitas deteksi dapat memperbesar kemungkinan kegagalan operasi pada sistem bertekanan.

PRV/PSV *stuck* dan *control valve stuck* memiliki nilai RPN yang sama karena kedua komponen tersebut merupakan bagian penting dalam pengendalian tekanan proses. PRV/PSV berfungsi sebagai pelepas tekanan lebih, sedangkan *control valve* mengatur kestabilan aliran *propylene*. Kegagalan pada salah satu komponen tersebut dapat meningkatkan tekanan proses secara cepat dan menurunkan efektivitas *safety barrier*. Hasil ini mendukung penelitian Kuchekar et al. [9] yang menunjukkan bahwa *pressure relief valve* menjadi salah satu komponen paling kritis dalam sistem proteksi tekanan industri proses.

IV. KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa risiko *overpressure* pada PRU tidak terbentuk dari satu sumber kegagalan tunggal, tetapi dari kombinasi kegagalan operasi, instrumentasi, sistem proteksi tekanan, kontrol aliran, perpindahan panas, dan integritas peralatan. Delapan *failure mode* yang teridentifikasi meliputi *human error* operasi, *pressure transmitter error*, PRV/PSV *stuck*, *control valve stuck*, tekanan kolom tidak terkendali, HIPPS gagal berfungsi, *heat exchanger fouling*, dan kebocoran pipa bertekanan. Temuan ini konsisten dengan tujuan penelitian yang menempatkan FMEA sebagai alat untuk mengukur dan mengurutkan risiko *overpressure* secara kuantitatif pada komponen kritis PRU.

Hasil perhitungan RPN menunjukkan bahwa *human error* operasi menjadi prioritas risiko tertinggi dengan nilai RPN 280, diikuti *pressure transmitter error* sebesar 245, PRV/PSV *stuck* sebesar 240, dan *control valve stuck* sebesar 240. Urutan ini menunjukkan bahwa risiko *overpressure* pada PRU paling kuat dipengaruhi oleh kualitas respon operator, keandalan pembacaan tekanan, kemampuan pelepasan tekanan lebih, dan kestabilan pengaturan aliran *propylene*. Sementara itu, tekanan kolom tidak terkendali, HIPPS gagal berfungsi, *heat exchanger fouling*, dan kebocoran pipa bertekanan tetap memerlukan pengendalian karena berhubungan dengan kestabilan operasi dan fungsi *safety barrier*.

Rekomendasi mitigasi perlu diarahkan berdasarkan urutan prioritas RPN. Pengendalian risiko utama mencakup pelatihan operator berbasis skenario *overpressure*, penyederhanaan SOP operasi abnormal, kalibrasi berkala *pressure transmitter*, pengujian fungsional PRV/PSV, perbaikan atau *overhaul control valve*, inspeksi *heat exchanger*, serta evaluasi fungsi HIPPS. Penelitian ini membatasi hasil mitigasi sebagai rekomendasi berbasis prioritas risiko, bukan sebagai bukti keberhasilan implementasi di lapangan. Penelitian berikutnya perlu menggunakan log DCS, histori alarm, *work order maintenance*, dan data inspeksi multi-periode agar efektivitas mitigasi dapat divalidasi secara operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak operasional dan pemeliharaan Propylene Recovery Unit yang telah memberikan dukungan informasi teknis, data lapangan, serta masukan praktis selama proses identifikasi mode kegagalan dan penilaian risiko. Apresiasi juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Industri Universitas PGRI Adi Buana Surabaya atas dukungan akademik dalam penyusunan artikel ini. Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pemerintah, swasta, maupun institusi komersial.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] M. A. Jumali, Rusdiyantoro, A. R. Maulidah, and Y. Utomo, "Rearranging First-In First-Out (FIFO) Parts Layouts," *PROZIMA (Productivity, Optim. Manuf. Syst. Eng.)*, vol. 6, no. 2 SE-Articles, Jan. 2023, doi: 10.21070/prozima.v6i2.1580.
- [3] M. A. Jumali and E. B. Utomo, "CHANGE-ORIENTED LEADERSHIP : SAFETY COMMITMENT OR PERFORMANCE BEHAVIOR," *J. Tek. WAKTU*, vol. 16, no. 2, pp. 36–46, 2018, [Online]. Available: <http://jurnal.unipasby.ac.id/index.php/waktu/article/view/1666/1542>
- [4] 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.
- [5] M. A. Jumali, Rusdiyantoro, Yitno Utomo, Moch. Fatur Aangga Pratama, and Harno Suntoko, "Implementation of Workplace Safety in the Welding Industry: Challenges and Solutions," *Tibuna*, vol. 8, no. 1, pp. 9–14, 2025, doi: 10.36456/tibuna.8.1.9978.9-14.
- [6] 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.
- [7] M. A. Ridho and M. A. Jumali, "ANALISIS PENJADWALAN PEMELIHARAAN AC DI FAKULTAS TEKNIK," in *SEMNASTEK 2017*, 2017, no. iii, pp. 198–204. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1Ch3y8qThU5hxU0wcGP78AB-0lgva3QHm/view>
- [8] Shilfira Nova Pratiwi and Muhamad Abdul Jumali, "Implementasi Metode Line Balancing Guna Perbaikan Proses Produksi Di PT. Sol Sepatu Di Sidoarjo," *Semin. Nas. Has. Ris. dan Pengabd.*, vol. 6, no. SE-Penelitian, Jul. 2024, [Online]. Available: <https://snhrp.unipasby.ac.id/prosiding/index.php/snhrp/article/view/1146>
- [9] 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.
- [10] T. Yuri and R. Nurcahyo, *TQM manajemen kualitas total dalam perspektif teknik industri*. Jakarta: Indeks, 2013.
- [11] A. Cahyono and M. A. Jumali, "INCREASING THE PRODUCTIVITY OF THE FURNITURE INDUSTRY WITH KAIZEN CASE STUDY IN SBRC FURNITURE JEPARA," *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 8, no. 1, pp. 69–78, 2023.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] 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.
- [16] 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.
- [17] R. M. Jannah, S. Supriyadi, and A. Nalhadi, “Analisis Efektivitas pada Mesin Centrifugal dengan Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE),” *Pros. Semin. Nas. Ris. Ter. SENASSET*, no. 2013, pp. 170–175, 2017.
- [18] 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.
- [19] D. S. Dhamayanti, J. Alhilman, and N. Athari, “Usulan Preventive Maintenance Pada Mesin Komori Ls440 Dengan Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance (Rcm Ii) Dan Risk Based Maintenance (Rbm) Di Pt Abc,” *J. Rekayasa Sist. Ind.*, vol. 3, no. 02, p. 31, 2016, doi: 10.25124/jrsi.v3i02.29.
- [20] D. Triwardani, A. Rahman, and C. Tantrika, “Analisis Overall Equipment Effectiveness (OEE) dalam Meminimalisasi Six Big Losses Pada Mesin Produksi Dual Filters DD07 (studi kasus : PT. Filtrona Indonesia, Surabaya, Jawa Timur),” *Jur. Tek. Ind. Univ. Brawijaya*, vol. 07, pp. 379–391, 2012, [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/127943-ID-analisis-overall-equipment-effectiveness.pdf>
- [21] B. Prasisko and M. A. Jumali, “Identifikasi Jalur Kritis pada Proses Pemindahan Sarana Produksi Krimer Retail dengan Metode CPM pada PT X,” *Fact. J. Ind. Manaj. dan Rekayasa Sist. Ind.*, vol. 4, no. 2 SE-Articles, pp. 246–257, Jan. 2026, doi: 10.56211/factory.v4i2.1382.
- [22] F. Fassa, A. Soekiman, and A. Wibowo, “Manajemen Risiko di Industri Konstruksi Periode 2017 s. d 2020: Tinjauan Sistematis dan Analisis Konten,” *Simp. Nas. Teknol. Infrastruktur Abad Ke-21, Febr.*, 2021.
- [23] G. Popov, B. K. Lyon, and B. D. Hollcroft, *Risk Assessment: A Practical Guide to Assessing Operational Risks*. Wiley, 2022.
- [24] I. O. for Standardization, “ISO 31010:2019 Risk Management: Risk Assessment Techniques.” International Organization for Standardization, 2019.
- [25] D. Bertsimas and N. Kallus, “From Predictive to Prescriptive Analytics,” *Manage. Sci.*, vol. 66, no. 3, pp. 1025–1044, Aug. 2019, doi: 10.1287/mnsc.2018.3253.
- [26] C. A. Naranjo, “A method for estimating the probability of adverse drug reactions,” *Clin. Pharmacol. Ther.*, vol. 30, no. 2, pp. 239–245, 1981, doi: 10.1038/clpt.1981.154.
- [27] 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.
- [28] J. D. Burlison, R. R. Quillivan, L. M. Kath, Y. Zhou, and ..., “A multilevel analysis of US hospital patient safety culture relationships with perceptions of voluntary event reporting,” *Journal of patient ...*. ncbi.nlm.nih.gov, 2020. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5415419/>
- [29] 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.
- [30] Indonesia.Badan Standardisasi Nasional, *Peraturan Badan Standardisasi Nasional Nomor 4 Tahun 2023 tentang Perubahan Kedua Atas Peraturan Badan Standardisasi Nasional Nomor 4 Tahun 2021 tentang Skema Penilaian Kesesuaian terhadap Standar Nasional Indonesia Sektor Pertanian, Perkebunan, Peternakan*. Indonesia, 2023. [Online]. Available: <https://jdih.bsn.go.id/dokumen-hukum-detail/Peraturan-Badan-Standardisasi-Nasional-Nomor-4-Tahun-2023-tentang-Perubahan-Kedua-Atas-Peraturan-Badan-Standardisasi-Nasional-Nomor-4-Tahun-2021-tentang-Skema-Penilaian-Kesesuaian-terhadap-Standar-Nasional-Indon>
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] R. Zhang, T. Chen, Y. Wang, and M. Short, “Systems approaches for sustainable fisheries: A

comprehensive review and future perspectives,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 41, pp. 242–252, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.08.013>.