

INTEGRASI PENGENDALIAN PROSES SEBAGAI UPAYA PENCEGAHAN RISIKO KESELAMATAN KERJA DI INDUSTRI KIMIA

Riny Yolandha Parapat¹, Aldi Muhamad Rizky², Nisa Wahyu Septiyaningsih³

Department of Chemical Engineering, Institute Technology National Bandung^{1,2,3}

Email: rinyyolandha@itenas.ac.id¹, aldi.muhamad@mhs.itenas.ac.id², nisa.wahyu@mhs.itenas.ac.id³

Informasi	Abstract
Volume : 3 Nomor : 2 Bulan : Februari Tahun : 2026 E-ISSN : 3062-9624	<p><i>The chemical industry is a sector with a high level of occupational safety risk due to the use of hazardous materials, extreme operating conditions, and the complexity of the processes involved. Therefore, systematic and integrated efforts are required to prevent occupational safety risks. One of the approaches that plays an important role in this effort is process control. This paper discusses the integration of process control as an effort to prevent occupational safety risks in the chemical industry. The discussion focuses on the relationship between process control and occupational safety, the concept of integrating process control with safety systems, and the strategies for its implementation in chemical industry activities. The integration of process control includes the regulation of critical variables such as temperature, pressure, flow rate, and level, supported by control systems, alarms, interlocks, and safe operating limits as part of process risk management. A review of the literature shows that the implementation of integrated process safety systems, including process control and safety management, can significantly reduce the number of process safety incidents. For example, industry reports compiled by the American Chemistry Council indicate that the implementation of process safety programs and integrated control systems has reduced process safety incidents by approximately 48% since 2000 among companies participating in the Responsible Care program. In addition, other studies analyzing industrial accidents indicate that companies with low levels of process safety management implementation have a much higher probability of accidents, and most major accidents occur in facilities with inadequate process safety systems. This demonstrates that the presence of effective process control systems and safety management plays a significant role in reducing industrial accident risks. Therefore, the integration of process control with occupational safety systems can prevent abnormal operating conditions, reduce the potential for accidents caused by human error, and improve the reliability and safety of chemical plant operations. Process control integration thus becomes a key element in supporting the achievement of a safe and sustainable working environment in the chemical industry.</i></p>

Keyword: process control integration, occupational safety, chemical industry, process risk management.

Abstrak

Industri kimia merupakan sektor dengan tingkat risiko keselamatan kerja yang tinggi akibat penggunaan bahan berbahaya, kondisi operasi ekstrem, serta kompleksitas proses yang terlibat. Oleh karena itu, diperlukan upaya pencegahan risiko keselamatan kerja yang bersifat sistematis dan terintegrasi. Salah satu pendekatan yang berperan penting dalam upaya tersebut adalah

pengendalian proses. Paper ini membahas integrasi pengendalian proses sebagai upaya pencegahan risiko keselamatan kerja di industri kimia. Pembahasan difokuskan pada keterkaitan antara pengendalian proses dan keselamatan kerja, konsep integrasi pengendalian proses dengan sistem keselamatan, serta strategi penerapannya dalam aktivitas industri kimia. Integrasi pengendalian proses mencakup pengendalian variabel kritis seperti suhu, tekanan, laju alir, dan level, yang didukung oleh sistem kontrol, alarm, interlock, serta batas operasi aman sebagai bagian dari manajemen risiko proses. Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa penerapan sistem keselamatan proses yang terintegrasi, termasuk pengendalian proses dan manajemen keselamatan, mampu menurunkan jumlah insiden keselamatan proses secara signifikan. Sebagai contoh, laporan industri kimia yang dihimpun oleh American Chemistry Council menunjukkan bahwa penerapan program keselamatan proses dan sistem pengendalian terintegrasi mampu mengurangi insiden keselamatan proses hingga sekitar 48% sejak tahun 2000 pada perusahaan-perusahaan anggota program Responsible Care. Selain itu, studi lain yang menganalisis kecelakaan industri menunjukkan bahwa perusahaan dengan tingkat penerapan manajemen keselamatan proses yang rendah memiliki probabilitas kecelakaan yang jauh lebih tinggi, dan sebagian besar kecelakaan besar terjadi pada fasilitas dengan sistem keselamatan proses yang tidak memadai. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan sistem pengendalian proses dan manajemen keselamatan yang baik berperan penting dalam menurunkan risiko kecelakaan industri secara signifikan. Dengan demikian, integrasi pengendalian proses dengan sistem keselamatan kerja mampu mencegah terjadinya kondisi operasi tidak normal, menurunkan potensi kecelakaan akibat kesalahan manusia, serta meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi industri kimia. Integrasi pengendalian proses menjadi elemen kunci dalam mendukung pencapaian lingkungan kerja yang aman dan berkelanjutan di industri kimia.

Kata Kunci: integrasi pengendalian proses, keselamatan kerja, industri kimia, manajemen risiko proses.

A. PENDAHULUAN

Industri kimia merupakan salah satu sektor utama dalam bidang manufaktur yang memiliki peran strategis dalam produksi berbagai kebutuhan penting, seperti bahan kimia, petrokimia, farmasi, pupuk, serta produk pangan dan minuman. Aktivitas produksi di sektor ini melibatkan penggunaan bahan kimia berbahaya, energi dalam jumlah besar, serta peralatan berskala industri yang beroperasi pada kondisi ekstrem, seperti suhu dan tekanan tinggi. Karakteristik tersebut menjadikan industri kimia sebagai sektor dengan tingkat kompleksitas proses dan risiko keselamatan kerja yang tinggi. Apabila tidak dikelola dengan baik, kondisi ini berpotensi memicu kecelakaan kerja yang berdampak serius terhadap keselamatan pekerja, lingkungan, serta keberlanjutan operasional perusahaan.

Seiring dengan perkembangan teknologi dan meningkatnya tuntutan efisiensi serta produktivitas, sistem proses di industri kimia menjadi semakin kompleks dan terintegrasi. Proses kimia modern bersifat dinamis, multiskala, berdimensi tinggi, serta menunjukkan perilaku nonlinier, sehingga sangat sensitif terhadap gangguan dan ketidakpastian. Kondisi ini menyebabkan metode penilaian risiko statis konvensional menjadi kurang efektif dalam mengantisipasi perubahan kondisi operasi yang dapat meningkatkan tingkat risiko secara signifikan (Ziani et al., 2026). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengelolaan risiko yang

lebih adaptif dan berkelanjutan agar potensi bahaya dapat dikendalikan secara optimal. Sebagian besar proses kimia dan biokimia dipengaruhi oleh berbagai ketidakpastian, baik yang berasal dari fluktuasi kondisi operasi, keterbatasan sensor, maupun gangguan eksternal. Oleh sebab itu, pemantauan proses secara real-time dan berkelanjutan menjadi aspek krusial dalam pengendalian proses modern(Himmel et al., 2023). Pemanfaatan data operasional secara real-time memungkinkan deteksi dini terhadap penyimpangan proses, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum kondisi operasi mencapai batas berbahaya dan meningkatkan risiko kecelakaan kerja (Ziani et al., 2026).

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dalam industri kimia tidak dapat dipisahkan dari konsep keselamatan proses (process safety). Keselamatan proses menitikberatkan pada pencegahan kejadian besar, seperti kebocoran bahan kimia berbahaya, kebakaran, dan ledakan, yang berpotensi menimbulkan korban jiwa serta kerusakan lingkungan. Dalam hal ini, pengendalian proses berfungsi sebagai salah satu lapisan perlindungan utama yang berperan dalam mendekripsi, mengendalikan, dan mencegah penyimpangan proses agar tetap berada dalam batas operasi yang aman. Penerapan manajemen keselamatan proses berbasis penilaian risiko sistematis terbukti mampu menurunkan potensi kecelakaan besar melalui pengendalian kondisi operasi yang lebih terkendali(Ziani et al., 2026).

Seiring perkembangan teknologi, pendekatan berbasis model dan data semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan kinerja pengendalian proses. Model matematika digunakan untuk merepresentasikan dinamika proses dan mendukung pengambilan keputusan, meskipun pembentukan model berbasis prinsip dasar sering kali membutuhkan biaya tinggi dan sulit diterapkan pada sistem yang sangat kompleks (Himmel et al., 2023). Oleh karena itu, pemanfaatan data historis dan pendekatan berbasis pembelajaran mesin mulai dikembangkan untuk mendukung pengendalian proses yang lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi operasi. Namun demikian, penerapan teknologi canggih tersebut harus tetap memperhatikan aspek keselamatan, mengingat ketidakpastian data, keterbatasan jumlah data, serta potensi kegagalan sistem dapat menimbulkan risiko keselamatan yang signifikan apabila tidak diantisipasi dengan baik(Himmel et al., 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, integrasi pengendalian proses dengan sistem keselamatan kerja merupakan pendekatan yang esensial dalam upaya pencegahan risiko keselamatan kerja di industri kimia. Integrasi ini mencakup keterpaduan pengendalian variabel proses kritis, penerapan sistem alarm dan interlock, serta penetapan batas operasi aman yang didukung oleh prosedur operasional standar. Pendekatan integratif ini diharapkan mampu

menciptakan mekanisme pencegahan risiko yang komprehensif, meningkatkan budaya keselamatan, serta menurunkan tingkat kecelakaan dan meningkatkan keandalan operasi industri(Ziani et al., 2026).

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur. Metode ini dipilih karena penelitian bertujuan untuk menganalisis konsep serta strategi integrasi pengendalian proses dalam upaya pencegahan risiko keselamatan kerja di industri kimia berdasarkan kajian teori dan hasil penelitian terdahulu.

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian deskriptif kualitatif, yang berfokus pada penguraian konsep, hubungan sebab-akibat, serta implementasi integrasi pengendalian proses terhadap keselamatan kerja. Penelitian ini tidak menggunakan eksperimen laboratorium, melainkan menganalisis sumber ilmiah yang relevan untuk memperoleh pemahaman komprehensif terkait permasalahan.

Sumber Data

Data yang digunakan merupakan data sekunder, yang diperoleh dari berbagai referensi ilmiah, meliputi jurnal nasional dan internasional, buku akademik, laporan lembaga industri, serta dokumen pendukung lain yang berkaitan dengan keselamatan proses dan pengendalian proses. Literatur yang digunakan difokuskan pada pembahasan variabel proses kritis seperti temperatur, tekanan, laju alir, dan level, serta sistem pendukung keselamatan seperti alarm, interlock, Safety Instrumented System (SIS), dan safe operating limits.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui studi kepustakaan, yaitu penelusuran dan seleksi literatur ilmiah yang sesuai dengan topik penelitian. Literatur yang dikumpulkan kemudian dipilih berdasarkan tingkat relevansi terhadap integrasi pengendalian proses, manajemen risiko proses, dan penerapan keselamatan kerja pada industri kimia. Data yang telah terkumpul selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menyusun pembahasan dan kesimpulan penelitian.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode analisis isi. Tahapan analisis meliputi reduksi data dengan memilih informasi penting, pengelompokan data berdasarkan tema utama seperti konsep K3, sistem pengendalian proses, strategi integrasi kontrol-keselamatan,

manfaat implementasi, serta studi kasus kecelakaan industri. Selanjutnya dilakukan interpretasi dan sintesis untuk memperoleh gambaran hubungan antara pengendalian proses dan upaya pencegahan kecelakaan kerja. Hasil analisis kemudian dirumuskan menjadi kesimpulan dan rekomendasi penerapan integrasi pengendalian proses dalam industri kimia.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di Industri Kimia

Konsep dan Tujuan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

K3 merupakan suatu sistem yang dirancang untuk melindungi tenaga kerja dari potensi bahaya yang dapat timbul selama aktivitas kerja, khususnya di lingkungan industri yang memiliki tingkat risiko tinggi seperti industri kimia. Dalam konteks industri kimia, K3 tidak hanya berfokus pada perlindungan pekerja secara individual, tetapi juga mencakup pengendalian terhadap proses, peralatan, serta bahan kimia berbahaya yang digunakan dalam kegiatan produksi. Penerapan K3 menjadi sangat penting mengingat karakteristik industri kimia yang melibatkan reaksi kimia, tekanan dan suhu tinggi, serta penggunaan bahan yang bersifat mudah terbakar, beracun, dan korosif.

Tujuan utama penerapan K3 di industri kimia adalah untuk menjamin keselamatan pekerja, melindungi lingkungan sekitar, serta menjaga keandalan dan keberlanjutan aset industri. Penerapan K3 yang efektif mampu menurunkan frekuensi dan tingkat keparahan kecelakaan, sekaligus mendukung kepatuhan terhadap regulasi keselamatan yang ditetapkan oleh pemerintah dan lembaga internasional(Chen, 2016). Dengan demikian, K3 berperan sebagai fondasi penting dalam menciptakan operasi industri kimia yang aman dan berkelanjutan.

Risiko Keselamatan Kerja di Industri Kimia

Industri kimia memiliki karakteristik operasi yang menjadikannya sebagai salah satu sektor dengan tingkat risiko keselamatan kerja yang tinggi. Risiko tersebut muncul akibat keterlibatan bahan kimia berbahaya, energi dalam jumlah besar, serta sistem proses yang kompleks dan saling terintegrasi. Dalam konteks keselamatan kerja, risiko di industri kimia tidak hanya berdampak pada pekerja secara langsung, tetapi juga berpotensi menimbulkan konsekuensi luas terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar apabila terjadi kegagalan proses yang signifikan. Secara umum, risiko keselamatan kerja di industri kimia dapat diklasifikasikan ke dalam risiko fisik, kimia, dan mekanik. Risiko fisik meliputi paparan suhu tinggi, tekanan ekstrem, kebisingan, serta radiasi panas yang dapat menyebabkan cedera

serius pada pekerja. Risiko kimia berkaitan dengan paparan zat beracun, korosif, mudah terbakar, atau reaktif yang dapat menyebabkan keracunan, iritasi, hingga kematian apabila tidak dikendalikan dengan baik. Sementara itu, risiko mekanik berasal dari penggunaan peralatan berskala besar seperti reaktor, pompa, kompresor, dan sistem perpipaan bertekanan tinggi yang berpotensi menimbulkan kecelakaan akibat kegagalan mekanis atau kesalahan operasi.

Selain klasifikasi tersebut, kondisi operasi ekstrem merupakan faktor utama yang memperbesar tingkat risiko keselamatan kerja di industri kimia. Proses yang berlangsung pada suhu dan tekanan tinggi meningkatkan kemungkinan terjadinya kebocoran, kegagalan peralatan, maupun reaksi tak terkendali. Kegagalan dalam mengendalikan kondisi operasi kritis sering kali menjadi pemicu utama terjadinya kecelakaan besar di industri proses(Behie et al., 2020). Kondisi ini menunjukkan bahwa risiko keselamatan kerja tidak dapat dipisahkan dari stabilitas dan keandalan sistem proses secara keseluruhan.

Risiko keselamatan kerja di industri kimia juga sangat dipengaruhi oleh sifat dinamis dan kompleks dari sistem proses. Proses kimia umumnya bersifat nonlinier dan sensitif terhadap gangguan, sehingga perubahan kecil pada variabel operasi dapat memicu konsekuensi yang signifikan. Sebagian besar kecelakaan industri kimia terjadi akibat kombinasi antara kegagalan teknis, ketidakpastian proses, dan keterbatasan sistem pemantauan risiko yang bersifat statis(Chen, 2016). Hal ini menunjukkan pentingnya pendekatan penilaian risiko yang mampu menangkap dinamika proses secara menyeluruh. Dampak dari kecelakaan kerja di industri kimia tidak hanya terbatas pada cedera atau korban jiwa di kalangan pekerja, tetapi juga dapat menimbulkan pencemaran lingkungan dalam skala besar serta kerugian ekonomi yang signifikan. Pelepasan bahan kimia berbahaya akibat kegagalan proses dapat mencemari udara, tanah, dan sumber air, sehingga menimbulkan dampak jangka panjang terhadap kesehatan masyarakat dan ekosistem. Konsekuensi kecelakaan di industri kimia cenderung bersifat domino, di mana satu kegagalan proses dapat memicu rangkaian kejadian berbahaya lainnya(Ab Rahim et al., 2024).

Hubungan K3 dan Keselamatan Proses (Process Safety)

Keselamatan proses (process safety) merupakan pendekatan keselamatan yang berfokus pada pencegahan kecelakaan akibat kegagalan proses, khususnya yang melibatkan pelepasan bahan kimia berbahaya atau energi dalam skala besar. Berbeda dengan K3 konvensional yang lebih menekankan pada keselamatan individu dan kecelakaan kerja sehari-hari, keselamatan proses berorientasi pada integritas sistem, peralatan, dan

pengendalian proses secara menyeluruh. Industri kimia merupakan industri berisiko tinggi yang berpotensi menimbulkan kecelakaan besar akibat kehilangan kendali proses dan pelepasan bahan berbahaya. Penelitian tersebut menegaskan bahwa penerapan manajemen keselamatan proses yang efektif merupakan kunci dalam pencegahan kecelakaan besar di industri kimia, serta menekankan pentingnya pemanfaatan pengetahuan keselamatan proses secara menyeluruh sepanjang siklus hidup proses, mulai dari tahap perancangan hingga operasi dan penghentian proses(Chen, 2016). Dengan mengintegrasikan prinsip keselamatan proses ke dalam sistem K3, industri kimia dapat meningkatkan kemampuan pencegahan risiko, mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan besar, dan memperkuat budaya keselamatan secara berkelanjutan.

2. Pengendalian Proses dalam Industri Kimia

Pengertian dan Tujuan Pengendalian Proses

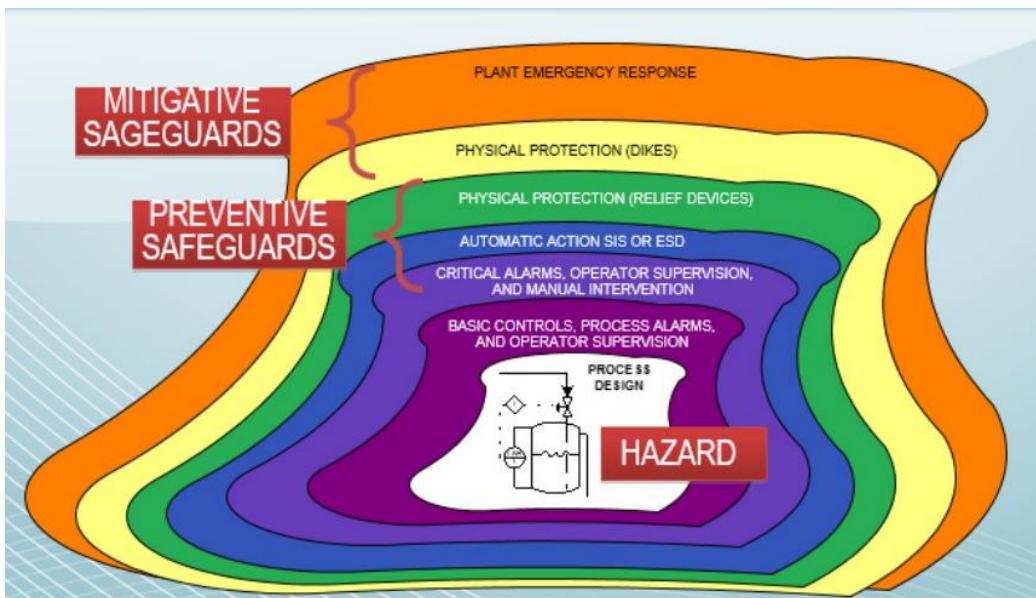
Pengendalian proses merupakan disiplin rekayasa yang mempelajari bagaimana variabel-variabel dalam suatu proses industri dipertahankan agar tetap berada pada nilai setpoint yang diinginkan, meskipun terdapat gangguan eksternal maupun perubahan beban operasi. Tujuan utama pengendalian proses adalah memastikan kestabilan proses, menjaga kualitas produk, dan meningkatkan efisiensi operasional dengan meminimalkan deviasi proses dari kondisi yang diharapkan(Parapat et al., n.d.). Dalam konteks industri kimia, pengendalian proses menjadi sangat penting karena variabel seperti suhu, tekanan, laju aliran, dan konsentrasi sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan maupun interaksi antar unit proses. Sistem pengendalian dapat dianalogikan sebagai “sistem saraf” pabrik, yang berfungsi mengumpulkan data dari berbagai sensor, memproses informasi tersebut, dan kemudian mengambil tindakan korektif agar operasi tetap aman dan stabil(Li et al., 2025).

Secara umum, tujuan pengendalian proses dalam operasi industri kimia meliputi menjaga kestabilan proses agar variabel penting tidak keluar dari batas aman selama operasi, menjamin kualitas produk karena proses yang tidak stabil cenderung menghasilkan produk yang tidak konsisten, meminimalkan gangguan melalui tindakan kontrol yang cepat sehingga operasi utama tidak terganggu, serta meningkatkan keselamatan dan efisiensi, karena sistem yang stabil dan terkendali dapat mencegah kondisi yang berpotensi menyebabkan kecelakaan maupun kerusakan peralatan.

3. Integrasi Pengendalian Proses dan Keselamatan Kerja

Konsep Integrasi Pengendalian Proses dengan Keselamatan Kerja

Integrasi pengendalian proses dengan keselamatan kerja merupakan pendekatan yang menggabungkan fungsi pengendalian operasi dan fungsi proteksi dalam satu kerangka sistem yang saling mendukung. Sistem kontrol proses berfungsi menjaga kondisi operasi tetap stabil, sedangkan sistem keselamatan berfungsi sebagai lapisan perlindungan tambahan apabila kondisi proses menyimpang dari batas aman. Pendekatan ini dikenal dalam literatur keselamatan proses sebagai konsep *layer of protection*, di mana beberapa lapisan perlindungan bekerja secara independen untuk menurunkan probabilitas terjadinya kecelakaan (*Risked Based Process Safety*, n.d.-a). Dalam praktik industri, integrasi ini diwujudkan melalui koordinasi antara sistem kontrol proses, sistem alarm, sistem interlock, serta sistem shutdown otomatis. Sensor yang digunakan untuk mengukur variabel proses seperti temperatur dan tekanan sering kali menjadi bagian dari dua sistem sekaligus, yaitu sistem kontrol dan sistem keselamatan, namun logika pengendaliannya biasanya dipisahkan untuk menjaga independensi fungsi keselamatan sesuai prinsip desain Safety Instrumented System (*Buku Sistem Kontrol - Dr. Zikri Noer, S.Si, M.Si Dan Dr. Indri Dayana, M.Si - Google Buku*, n.d.). Untuk memberikan gambaran konseptual mengenai hubungan antara sistem kontrol proses dan sistem keselamatan, Gambar 3.1 menunjukkan ilustrasi integrasi lapisan pengendalian dan proteksi dalam suatu unit proses industri.



Gambar 3.1 Ilustrasi integrasi pengendalian proses dan sistem keselamatan sebagai lapisan perlindungan dalam industri proses

(Sumber : diadaptasi dari konsep Layer of Protection Willey, 2014) .

Gambar 3.1 menunjukkan bahwa sistem pengendalian proses berfungsi sebagai lapisan perlindungan pertama yang bekerja secara kontinu untuk menjaga variabel operasi tetap

berada dalam batas aman. Apabila sistem kontrol tidak mampu mengoreksi penyimpangan proses, maka sistem alarm memberikan peringatan kepada operator, dan apabila kondisi semakin memburuk, sistem proteksi independen seperti Safety Instrumented System akan melakukan shutdown otomatis untuk mencegah terjadinya kecelakaan. Peran pengendalian proses dalam pencegahan risiko dapat dilihat dari kemampuannya mendeteksi deviasi proses pada tahap awal. Sebagai contoh, kenaikan temperatur pada reaktor eksotermik dapat meningkatkan laju reaksi secara eksponensial sesuai dengan hubungan kinetika reaksi terhadap temperatur. Sistem kontrol temperatur yang bekerja dengan prinsip umpan balik akan meningkatkan laju pendinginan atau menurunkan laju reaksi sehingga temperatur dapat kembali mendekati nilai setpoint. Tanpa pengendalian temperatur yang memadai, kondisi ini dapat berkembang menjadi runaway reaction yang berpotensi menyebabkan kegagalan peralatan dan ledakan (Adnan Syahdi Jalil, 2023).

Selain itu, pengendalian tekanan berperan penting dalam mencegah overpressure pada bejana tekan dan sistem perpipaan. Sistem kontrol tekanan dan relief valve dirancang untuk menjaga tekanan tetap berada dalam batas desain peralatan. Kegagalan pengendalian tekanan merupakan salah satu penyebab umum kecelakaan industri kimia yang melibatkan pecahnya bejana tekan dan pelepasan energi secara tiba-tiba. Pengendalian level juga memiliki peran penting dalam keselamatan proses, terutama pada tangki penyimpanan dan kolom distilasi. Kondisi overflow atau level rendah yang ekstrem dapat mengganggu kestabilan operasi dan memicu kondisi berbahaya. Sistem kontrol level menjaga keseimbangan antara aliran masuk dan aliran keluar sehingga operasi tetap stabil dan aman. Dari uraian tersebut dapat dipahami bahwa pengendalian proses tidak hanya berfungsi menjaga kualitas produk dan efisiensi operasi, tetapi juga berperan langsung dalam pencegahan risiko keselamatan kerja. Dengan menjaga variabel proses tetap berada dalam batas aman, sistem kontrol proses mencegah terjadinya kondisi yang dapat memicu kecelakaan. Oleh karena itu, integrasi antara pengendalian proses dan sistem keselamatan merupakan pendekatan yang efektif dalam menurunkan probabilitas kecelakaan industri kimia dan meningkatkan keandalan operasi secara keseluruhan.

Strategi Integrasi dalam Industri Kimia

Integrasi pengendalian proses dengan keselamatan kerja dalam industri kimia tidak hanya bergantung pada keberadaan sistem kontrol, tetapi juga pada strategi penerapan yang sistematis dan berlapis. Strategi ini dirancang untuk memastikan bahwa setiap tahapan operasi proses memiliki mekanisme pengendalian yang mampu mendeteksi, mengoreksi, dan

mencegah kondisi berbahaya sebelum berkembang menjadi kecelakaan. Dalam praktik industri, beberapa strategi utama yang banyak diterapkan meliputi penetapan batas operasi aman, penerapan sistem alarm dan interlock, serta pemantauan dan kontrol berbasis data real-time. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *process safety management* yang menekankan pentingnya pengendalian kondisi operasi sebagai bagian dari pencegahan kecelakaan industri(Fajriah et al., 2026) .

Penetapan Batas Operasi Aman (Safe Operating Limits)

Salah satu langkah paling mendasar dalam integrasi pengendalian proses dan keselamatan kerja adalah penetapan batas operasi aman atau *safe operating limits*. Batas ini merupakan rentang nilai variabel proses seperti temperatur, tekanan, level, dan laju alir yang masih dapat diterima tanpa menimbulkan risiko signifikan terhadap keselamatan proses maupun integritas peralatan. Penetapan batas operasi aman biasanya didasarkan pada data desain peralatan, hasil analisis bahaya proses, serta karakteristik reaksi kimia yang terlibat. Sebagai contoh, pada reaktor eksotermik, batas temperatur maksimum ditentukan berdasarkan titik di mana laju reaksi meningkat secara drastis dan sistem pendingin tidak lagi mampu mengendalikan pelepasan panas. Penetapan batas ini sangat penting karena sistem kontrol proses dan sistem alarm bekerja berdasarkan parameter batas tersebut.

Untuk memberikan gambaran mengenai hubungan antara variabel proses dan batas operasi aman, Tabel 1 menyajikan contoh parameter operasi dan batas aman yang umum digunakan dalam industri proses.

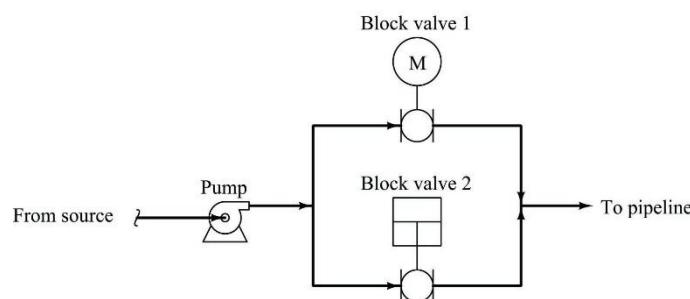
Tabel 1. Contoh Variabel Proses dan Batas Operasi Aman

Variabel Proses	Parameter yang Dikendalikan	Risiko Jika Melebihi Batas
Temperatur reaktor	Temperatur maksimum	Runaway reaction
Tekanan bejana	Tekanan desain	Pecahnya bejana
Level tangki	Level maksimum	Overflow
Laju alir umpan	Flow maksimum	Ketidakstabilan proses

Tabel 1 menunjukkan bahwa setiap variabel proses memiliki batas operasi yang ditentukan untuk mencegah kondisi berbahaya. Apabila batas tersebut dilampaui, sistem kontrol dan sistem proteksi harus mampu mengambil tindakan korektif secara otomatis. Penetapan batas operasi aman juga berfungsi sebagai dasar dalam desain alarm, interlock, dan sistem shutdown otomatis, sehingga seluruh sistem pengendalian dapat bekerja secara terkoordinasi dalam menjaga keselamatan proses (Pratama et al., 2023).

Sistem Alarm dan Interlock

Strategi berikutnya dalam integrasi pengendalian proses adalah penerapan sistem alarm dan interlock. Sistem alarm berfungsi memberikan peringatan dini kepada operator ketika variabel proses mulai mendekati batas operasi aman. Dengan adanya peringatan ini, operator dapat melakukan tindakan korektif sebelum kondisi menjadi kritis. Namun, dalam banyak kasus, kondisi proses dapat berkembang dengan sangat cepat sehingga tindakan manual oleh operator tidak cukup. Oleh karena itu, sistem interlock digunakan untuk melakukan tindakan otomatis seperti menutup katup, menghentikan pompa, atau mematikan pemanas ketika parameter proses melampaui batas tertentu. Untuk memperjelas hubungan antara alarm, interlock, dan shutdown otomatis, Gambar 3.2 menunjukkan diagram konseptual sistem peringatan dan proteksi dalam suatu proses industri.



Gambar 3.2 Diagram konseptual hubungan antara sistem alarm, interlock, dan shutdown otomatis dalam sistem pengendalian proses

(Sumber : diadaptasi dari konsep proteksi berlapis dalam keselamatan proses).

4. Manfaat Integrasi Pengendalian Proses terhadap Keselamatan Kerja

Integrasi pengendalian proses dengan sistem keselamatan memberikan berbagai manfaat yang signifikan dalam operasi industri kimia. Manfaat tersebut tidak hanya berkaitan dengan peningkatan efisiensi proses, tetapi juga berhubungan langsung dengan pencegahan kecelakaan kerja dan kegagalan proses yang dapat menimbulkan dampak serius terhadap pekerja, fasilitas, dan lingkungan.

Dalam industri proses, kecelakaan jarang terjadi secara tiba-tiba tanpa adanya tanda awal. Sebagian besar kejadian berbahaya diawali oleh penyimpangan kecil pada variabel operasi, seperti kenaikan temperatur secara perlahan, fluktuasi tekanan, atau perubahan komposisi yang tidak terdeteksi. Integrasi sistem pengendalian memungkinkan penyimpangan tersebut teridentifikasi lebih cepat sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum kondisi berkembang menjadi kegagalan proses. Pendekatan ini sejalan dengan

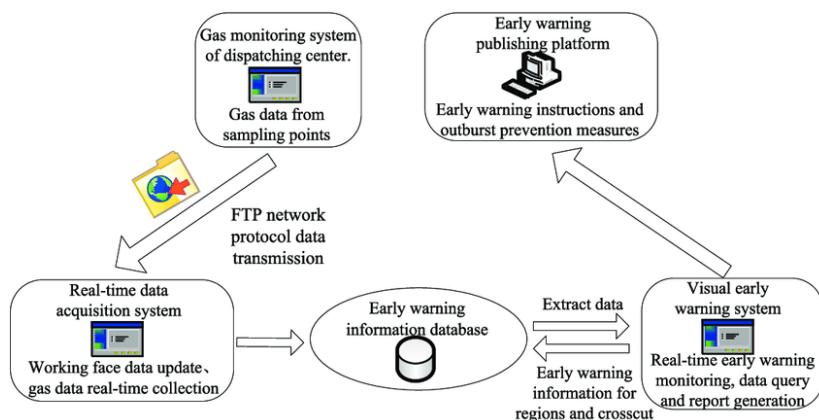
prinsip pencegahan dalam process safety management yang menekankan pentingnya deteksi dini dan pengendalian kondisi abnormal.

Pencegahan Kecelakaan Kerja dan Kegagalan Proses

Deteksi Dini Penyimpangan Operasi

Salah satu manfaat utama integrasi pengendalian proses adalah kemampuan sistem untuk mendeteksi penyimpangan operasi secara dini. Sensor yang terpasang pada berbagai titik proses secara kontinu mengukur variabel penting seperti temperatur, tekanan, level, dan laju alir. Data tersebut dikirim ke sistem kontrol yang membandingkannya dengan nilai setpoint atau batas operasi aman. Ketika terjadi deviasi, sistem kontrol akan melakukan koreksi otomatis, misalnya dengan menyesuaikan aliran pendingin, mengatur kecepatan pompa, atau membuka katup pengatur tekanan. Jika penyimpangan terus berlanjut, sistem alarm akan memberikan peringatan kepada operator, dan dalam kondisi tertentu sistem proteksi akan melakukan shutdown otomatis untuk mencegah terjadinya kecelakaan.

Untuk memperjelas tahapan deteksi dan respons terhadap penyimpangan proses, Gambar 4.1 menunjukkan alur dasar mekanisme deteksi dini dalam sistem pengendalian proses.



Gambar 4.1 Alur deteksi dini penyimpangan operasi dalam sistem pengendalian proses dan keselamatan.

(Sumber : (Zhang et al., 2020)

Gambar 4.1 tersebut menunjukkan bahwa deteksi dini merupakan tahap pertama dalam pencegahan kecelakaan. Semakin cepat penyimpangan terdeteksi, semakin kecil kemungkinan kondisi tersebut berkembang menjadi kegagalan proses yang serius. Selain itu, sistem pemantauan modern memungkinkan analisis tren sehingga penyimpangan yang berkembang secara perlahan dapat dikenali sebelum mencapai batas alarm. Kemampuan ini sangat penting dalam mencegah kegagalan peralatan yang bersifat progresif, seperti fouling

pada heat exchanger atau degradasi performa pompa. Dengan demikian, integrasi sistem pengendalian dan pemantauan proses memberikan kemampuan deteksi dini yang menjadi kunci utama dalam pencegahan kecelakaan industri.

Pengurangan Risiko Kecelakaan Besar

Manfaat lain dari integrasi pengendalian proses adalah pengurangan risiko kecelakaan besar (*major accident prevention*). Risiko kecelakaan dalam industri kimia biasanya berkaitan dengan peristiwa seperti ledakan, kebakaran, pelepasan bahan beracun, dan kegagalan peralatan bertekanan tinggi. Sistem pengendalian proses berperan menurunkan probabilitas terjadinya kejadian tersebut dengan menjaga kondisi operasi tetap stabil. Sistem alarm dan interlock memberikan lapisan perlindungan tambahan, sementara Safety Instrumented System berfungsi sebagai lapisan proteksi terakhir yang menghentikan proses sebelum kondisi berbahaya mencapai tingkat kritis. Untuk memberikan gambaran mengenai kontribusi masing-masing lapisan perlindungan terhadap pengurangan risiko, Tabel 2 merangkum hubungan antara sistem pengendalian dan dampak pencegahan kecelakaan. Tabel 2 menunjukkan bahwa setiap lapisan perlindungan memiliki peran yang berbeda namun saling melengkapi dalam menurunkan risiko kecelakaan. Pendekatan multilayer ini dikenal sebagai konsep *defense in depth* dalam keselamatan proses, di mana kegagalan satu lapisan masih dapat dikompensasi oleh lapisan lainnya.

Pengurangan risiko kecelakaan besar juga berdampak pada peningkatan keandalan operasi dan keberlanjutan produksi. Gangguan proses yang berujung pada shutdown darurat atau kerusakan peralatan tidak hanya menimbulkan risiko keselamatan, tetapi juga menyebabkan kerugian ekonomi yang besar. Oleh karena itu, integrasi pengendalian proses tidak hanya meningkatkan keselamatan kerja, tetapi juga meningkatkan efisiensi dan kontinuitas operasi industri. Dari uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa integrasi pengendalian proses memberikan manfaat yang nyata dalam pencegahan kecelakaan kerja dan kegagalan proses melalui deteksi dini penyimpangan operasi serta pengurangan risiko kecelakaan besar secara sistematis.

Tabel 2. Peran Sistem Pengendalian dalam Pengurangan Risiko Kecelakaan

Lapisan Sistem	Fungsi Utama	Dampak terhadap Risiko
Process control	Menjaga stabilitas operasi	Mencegah deviasi proses
Alarm system	Memberi peringatan dini	Mengurangi keterlambatan respons
Interlock & SIS	Shutdown otomatis	Mencegah kecelakaan besar
Relief system	Mengurangi tekanan	Mencegah ledakan

Peningkatan Keandalan dan Keberlanjutan Operasi

Selain berperan dalam mencegah kecelakaan kerja dan kegagalan proses, integrasi pengendalian proses juga memberikan manfaat yang signifikan terhadap peningkatan keandalan operasi dan keberlanjutan sistem industri secara keseluruhan. Dalam industri kimia, keandalan operasi tidak hanya berkaitan dengan kontinuitas produksi, tetapi juga dengan kemampuan sistem untuk beroperasi dalam kondisi stabil, efisien, dan aman dalam jangka waktu yang panjang. Proses yang stabil dan terkontrol dengan baik cenderung memiliki tingkat kegagalan yang lebih rendah, kebutuhan perawatan yang lebih terencana, serta dampak lingkungan yang lebih kecil. Peningkatan keandalan operasi melalui pengendalian proses yang terintegrasi juga berkontribusi pada keberlanjutan industri, karena operasi yang stabil umumnya membutuhkan energi yang lebih efisien, menghasilkan limbah yang lebih sedikit, dan meminimalkan kejadian darurat yang dapat menyebabkan pelepasan bahan berbahaya ke lingkungan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip operasi industri modern yang menekankan keseimbangan antara keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan (*Risked Based Process Safety*, n.d.-a).

Stabilitas Proses

Stabilitas proses merupakan salah satu indikator utama keandalan operasi dalam industri kimia. Proses yang stabil ditandai dengan variabel operasi yang berada dalam rentang yang sempit di sekitar nilai setpoint, fluktuasi yang minimal, serta kemampuan sistem untuk kembali ke kondisi normal setelah terjadi gangguan. Integrasi sistem pengendalian proses memungkinkan stabilitas ini dipertahankan melalui mekanisme pengukuran kontinu, kontrol otomatis, dan koreksi deviasi secara real-time. Sistem kontrol yang dirancang dengan baik mampu meredam gangguan dari perubahan kondisi bahan baku, variasi beban operasi, maupun fluktuasi lingkungan.

Stabilitas proses juga berpengaruh langsung terhadap integritas peralatan. Fluktuasi temperatur atau tekanan yang berulang dapat mempercepat kelelahan material, meningkatkan risiko kebocoran, dan memperpendek umur pakai peralatan. Dengan menjaga kondisi operasi tetap stabil, sistem pengendalian proses membantu memperpanjang umur peralatan dan mengurangi frekuensi kegagalan mekanik. Selain itu, stabilitas proses juga mempermudah pengawasan operasi oleh operator, karena kondisi proses yang stabil lebih mudah diprediksi dan dikendalikan dibandingkan proses yang sering mengalami fluktuasi besar.

Efisiensi Energi dan Operasional

Integrasi pengendalian proses juga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi energi dan operasional. Sistem kontrol yang optimal dapat menjaga kondisi operasi pada titik yang paling efisien tanpa mengorbankan keselamatan proses. Sebagai contoh, pada sistem distilasi, pengendalian temperatur dan reflux ratio yang tepat dapat meminimalkan konsumsi energi pada reboiler dan kondensor. Pada sistem perpindahan panas, pengendalian laju alir dan temperatur yang optimal dapat meningkatkan efisiensi heat exchanger dan mengurangi kebutuhan energi tambahan.

Efisiensi operasional juga meningkat karena sistem pengendalian yang terintegrasi memungkinkan deteksi dini terhadap kondisi yang dapat menyebabkan downtime, seperti fouling, penurunan performa pompa, atau penyumbatan aliran. Dengan adanya sistem pemantauan berbasis data, tindakan perawatan dapat dilakukan secara terencana sebelum terjadi kegagalan yang menyebabkan penghentian operasi. Pendekatan ini dikenal sebagai *predictive maintenance* dan telah terbukti mampu meningkatkan keandalan operasi sekaligus menurunkan biaya perawatan (*Risked Based Process Safety*, n.d.-a). Untuk memberikan gambaran mengenai hubungan antara pengendalian proses dan manfaat operasional, Tabel 3 merangkum beberapa kontribusi utama sistem pengendalian terhadap efisiensi dan keandalan. Manfaat pengendalian proses tidak hanya terbatas pada keselamatan, tetapi juga mencakup aspek efisiensi dan keandalan operasi secara keseluruhan.

Tabel 3. Kontribusi Pengendalian Proses terhadap Keandalan dan Efisiensi

Aspek Operasi	Peran Pengendalian Proses	Dampak
Stabilitas temperatur	Kontrol otomatis	Mengurangi konsumsi energi
Pengendalian tekanan	Optimasi operasi	Mengurangi risiko kerusakan
Monitoring real-time	Deteksi dini gangguan	Mengurangi downtime
Analisis data historis	Perawatan prediktif	Memperpanjang umur peralatan

5. Tantangan dan Peluang Implementasi di Industri Kimia

Tantangan Teknis dan Operasional

Implementasi pengendalian proses di industri kimia menghadapi berbagai tantangan teknis dan operasional yang berkaitan dengan karakteristik proses yang kompleks dan dinamis. Banyak proses industri memiliki sifat nonlinier, keterlambatan waktu, serta keterkaitan antar-sistem yang kuat sehingga menyulitkan pengendalian menggunakan

metode konvensional. Selain itu, perubahan kondisi operasi, variasi bahan baku, dan penuaan peralatan dapat menyebabkan model proses yang digunakan dalam sistem kontrol menjadi tidak akurat sehingga menurunkan performa pengendalian dan berpotensi menimbulkan ketidakstabilan proses. Penelitian yang dibahas dalam jurnal menunjukkan bahwa proses industri nyata sering mengalami ketidaksesuaian antara model dan kondisi aktual (*model-process mismatch*) akibat dinamika proses yang berubah seiring waktu, variasi bahan baku, dan gangguan eksternal. Kondisi ini menjadi tantangan utama dalam menjaga kualitas produk, efisiensi produksi, dan keselamatan operasi(Wu et al., n.d.).

Tantangan Sumber Daya Manusia

Selain aspek teknis, faktor sumber daya manusia juga menjadi tantangan penting dalam implementasi pengendalian proses di industri kimia. Pengoperasian sistem kontrol modern membutuhkan tenaga kerja yang tidak hanya memahami operasi peralatan, tetapi juga konsep dinamika proses, interpretasi data, serta prinsip keselamatan proses. Dalam praktik industri, banyak sistem kontrol lanjutan seperti Model Predictive Control (MPC) dan pengendalian berbasis data memerlukan pemahaman terhadap model matematis, analisis data, serta parameter tuning yang tepat. Tanpa kompetensi yang memadai, operator dapat mengalami kesulitan dalam memanfaatkan sistem kontrol secara optimal atau dalam merespons kondisi abnormal secara tepat. Jurnal tersebut juga menunjukkan bahwa pemanfaatan data historis dan pengalaman operasi merupakan bagian penting dalam menjaga keselamatan proses, yang berarti pengetahuan operator dan pengalaman praktis tetap menjadi faktor krusial dalam keberhasilan implementasi sistem kontrol modern(Wu et al., n.d.).

Peluang Pengembangan Teknologi Pengendalian dan Keselamatan

Di sisi lain, perkembangan teknologi memberikan peluang besar untuk meningkatkan efektivitas pengendalian proses dan keselamatan di industri kimia. Salah satu perkembangan penting adalah penggunaan metode pengendalian berbasis data (*data-driven control*) dan pembelajaran online yang memungkinkan sistem kontrol beradaptasi secara real-time terhadap perubahan kondisi proses. Pendekatan ini mampu meningkatkan akurasi model dan menjaga stabilitas operasi meskipun terjadi perubahan dinamika proses(Wu et al., n.d.).

6. Studi Kasus Kecelakaan Industri Kimia dan Kaitannya dengan Pengendalian Proses

Studi Kasus 1: Tragedi Bhopal (1984)

Salah satu kecelakaan industri kimia paling serius dalam sejarah adalah tragedi Bhopal yang terjadi pada tanggal 3 Desember 1984 di pabrik pestisida Union Carbide di India. Pada

kejadian ini, sejumlah besar gas beracun metil isosianat (MIC) terlepas ke atmosfer dan menyebar ke area pemukiman di sekitar pabrik, menyebabkan ribuan kematian dan ratusan ribu korban terpapar bahan beracun. Investigasi menunjukkan bahwa pelepasan gas tersebut dipicu oleh masuknya air ke dalam tangki penyimpanan MIC yang memicu reaksi eksotermik. Reaksi ini meningkatkan temperatur dan tekanan di dalam tangki secara signifikan sehingga terjadi pelepasan gas beracun ke lingkungan sekitar. Secara kinetika reaksi, peningkatan temperatur menyebabkan peningkatan laju reaksi secara eksponensial, sehingga kondisi runaway reaction dapat terjadi apabila sistem pendinginan tidak mampu mengimbangi pelepasan panas. Dari sudut pandang pengendalian proses, kecelakaan ini menunjukkan kegagalan pada beberapa lapisan pengendalian yang seharusnya mencegah eskalasi kondisi berbahaya. Sistem pendingin yang berfungsi menjaga temperatur tangki berada dalam batas aman tidak beroperasi secara optimal, sehingga temperatur tangki meningkat tanpa terkendali. Selain itu, sistem monitoring temperatur dan tekanan tidak memberikan informasi yang memadai kepada operator karena beberapa instrumen tidak berfungsi dengan baik.

Kegagalan lain yang berkontribusi terhadap kecelakaan adalah tidak berfungsinya sistem keselamatan tambahan, termasuk flare system dan scrubber yang seharusnya dapat mengurangi pelepasan gas beracun. Dalam konsep keselamatan proses modern, sistem-sistem tersebut merupakan bagian dari *independent protection layers*, yang dirancang untuk mencegah kecelakaan apabila sistem kontrol utama gagal (*Risked Based Process Safety*, n.d.-a). Untuk memahami peran pengendalian dalam kejadian ini, dapat dilihat bahwa variabel kritis dalam penyimpanan MIC meliputi temperatur, tekanan, dan komposisi. Apabila sistem kontrol temperatur bekerja secara optimal dan didukung oleh sistem alarm yang efektif, kenaikan temperatur akibat reaksi eksotermik dapat terdeteksi lebih awal sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum tekanan meningkat secara signifikan.

Selain kegagalan teknis, faktor organisasi juga berperan dalam kecelakaan ini. Kurangnya pelatihan operator, pengurangan tenaga kerja, serta pemeliharaan peralatan yang tidak memadai menyebabkan sistem pengendalian dan keselamatan tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas pengendalian proses tidak hanya bergantung pada teknologi, tetapi juga pada manajemen operasional dan budaya keselamatan. Tragedi Bhopal memberikan pelajaran penting bagi industri kimia global mengenai pentingnya integrasi antara pengendalian proses, sistem proteksi, dan manajemen keselamatan. Kejadian ini menjadi salah satu faktor yang mendorong berkembangnya konsep *Process Safety Management* (PSM) dan peningkatan standar keselamatan proses di berbagai

negara. Dengan demikian, tragedi Bhopal menunjukkan bahwa kegagalan dalam menjaga stabilitas variabel proses serta kegagalan sistem pengendalian dan proteksi dapat menyebabkan kecelakaan berskala besar dengan dampak yang sangat luas terhadap manusia dan lingkungan.

Analisis Kegagalan Berlapis pada Kasus Bhopal

Dalam keselamatan proses modern, pencegahan kecelakaan didasarkan pada konsep *Layer of Protection* atau *defense in depth*, yaitu penggunaan beberapa lapisan perlindungan yang bekerja secara independen untuk mencegah kejadian berbahaya. Lapisan tersebut umumnya meliputi desain proses, sistem pengendalian proses, sistem alarm, prosedur operasi, serta sistem proteksi independen seperti relief system dan scrubber(*Risked Based Process Safety*, n.d.-b). Pada tragedi Bhopal, investigasi menunjukkan bahwa beberapa lapisan perlindungan gagal secara berurutan. Kegagalan berlapis inilah yang menyebabkan kondisi abnormal berkembang menjadi kecelakaan besar. Untuk memahami mekanisme tersebut, diagram berikut menunjukkan ilustrasi konseptual kegagalan lapisan perlindungan pada kasus Bhopal. Gambar 6.1 menunjukkan bahwa kecelakaan tidak terjadi akibat satu kegagalan tunggal, melainkan akibat kegagalan beberapa lapisan perlindungan secara bersamaan. Prinsip ini merupakan salah satu konsep dasar dalam analisis risiko proses yang dikenal sebagai *multiple barrier failure*.



Gambar 6.1 Diagram kegagalan berlapis (*layer of protection failure*) pada kecelakaan Bhopal (1984)

Dari sudut pandang pengendalian proses, lapisan kedua dan ketiga memiliki peran yang sangat krusial. Sistem kontrol temperatur dan sistem pendingin seharusnya mampu menjaga kondisi penyimpanan MIC tetap stabil. Apabila sistem pendingin bekerja dengan baik, kenaikan temperatur akibat reaksi eksotermik dapat dikendalikan sehingga tekanan tidak meningkat secara signifikan. Selain itu, sistem monitoring temperatur dan tekanan seharusnya memberikan peringatan dini kepada operator sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum kondisi mencapai titik kritis. Kegagalan pada lapisan pengendalian ini menunjukkan pentingnya keandalan instrumentasi dan pemeliharaan sistem kontrol. Sensor temperatur, pressure transmitter, dan sistem alarm merupakan komponen yang relatif sederhana dibandingkan dengan sistem proteksi besar seperti flare atau scrubber, namun kegagalan pada komponen ini dapat menyebabkan keterlambatan deteksi kondisi berbahaya yang berakibat fatal (*Safety in Chemical Engineering Education / ACS Chemical Health & Safety*, n.d.)

Selain aspek teknis, faktor organisasi juga berperan dalam kegagalan lapisan perlindungan. Kurangnya pemeliharaan, pengurangan tenaga kerja, serta lemahnya budaya keselamatan menyebabkan sistem pengendalian dan sistem proteksi tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Analisis ini menunjukkan bahwa integrasi pengendalian proses dan sistem keselamatan harus dirancang tidak hanya dari sisi teknis, tetapi juga dari sisi manajemen operasi dan pemeliharaan. Sistem yang dirancang dengan baik tetap dapat gagal apabila tidak dipelihara atau dioperasikan sesuai prosedur.

Studi Kasus 2: Ledakan Kilang Texas City (2005)

Studi kasus lain yang sering dijadikan referensi dalam keselamatan proses adalah ledakan kilang minyak Texas City pada tahun 2005. Ledakan terjadi ketika awan uap hidrokarbon terbentuk akibat luapan cairan dari unit proses isomerisasi dan kemudian terbakar, menyebabkan ledakan besar yang menewaskan 15 pekerja dan melukai lebih dari 180 orang (1, n.d.). Investigasi menunjukkan bahwa kecelakaan ini disebabkan oleh kombinasi kegagalan pengendalian proses, kelemahan sistem alarm, serta masalah dalam manajemen keselamatan. Salah satu faktor utama adalah kegagalan pemantauan level cairan dalam kolom proses, yang menyebabkan cairan terisi melebihi kapasitas dan akhirnya meluap ke sistem vent. Kondisi ini menghasilkan pelepasan hidrokarbon yang kemudian membentuk awan uap mudah terbakar(Laksono & Widanarko, 2024).

Dari perspektif pengendalian proses, kejadian ini menunjukkan pentingnya pemantauan level, tekanan, dan temperatur secara akurat, terutama selama kondisi transien seperti start-

up dan shutdown. Pada kondisi tersebut, sistem belum mencapai keadaan tunak sehingga variabel proses cenderung berfluktuasi dan risiko deviasi meningkat. Sistem kontrol yang dirancang untuk operasi steady-state sering kali tidak cukup efektif apabila tidak dilengkapi dengan prosedur operasi yang tepat untuk kondisi transien. Kegagalan sistem alarm juga menjadi faktor penting dalam kecelakaan ini. Beberapa alarm tidak memberikan indikasi yang jelas mengenai kondisi proses yang berbahaya, sehingga operator tidak menyadari bahwa level cairan telah mencapai kondisi kritis. Dalam desain sistem kontrol modern, manajemen alarm menjadi aspek penting untuk memastikan bahwa alarm yang muncul benar-benar memberikan informasi yang relevan dan dapat ditindaklanjuti oleh operator. Selain itu, investigasi juga menunjukkan bahwa tata letak fasilitas berkontribusi terhadap besarnya dampak kecelakaan. Penempatan bangunan sementara di dekat unit proses berbahaya meningkatkan jumlah korban jiwa ketika ledakan terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa keselamatan proses tidak hanya berkaitan dengan pengendalian variabel proses, tetapi juga mencakup desain fasilitas dan manajemen risiko secara keseluruhan

Studi kasus Texas City menegaskan bahwa sistem pengendalian proses yang baik harus didukung oleh sistem alarm yang efektif, prosedur operasi yang jelas, serta budaya keselamatan yang kuat. Tanpa integrasi tersebut, bahkan fasilitas industri modern sekalipun tetap memiliki risiko kecelakaan yang tinggi. Gambar 6.2 menunjukkan bahwa kegagalan pada tahap awal pengendalian proses dapat berkembang menjadi kecelakaan besar apabila tidak ada lapisan perlindungan yang mampu menghentikan eskalasi kondisi berbahaya. Dari perspektif teknik kimia, kasus ini menegaskan pentingnya pengendalian proses pada kondisi transien seperti start-up dan shutdown. Pada kondisi tersebut, variabel proses sering mengalami perubahan cepat dan tidak berada pada keadaan tunak, sehingga sistem kontrol harus dirancang untuk mampu menangani dinamika proses yang lebih kompleks(Parapat et al., 2026). Selain itu, manajemen alarm juga menjadi faktor penting. Alarm yang terlalu banyak atau tidak jelas prioritasnya dapat menyebabkan operator mengabaikan alarm kritis. Fenomena ini dikenal sebagai *alarm flooding* dan telah diidentifikasi sebagai salah satu penyebab kegagalan respons operator dalam berbagai kecelakaan industri.



Gambar 6.2 Diagram kegagalan berlapis (*layer of protection failure*) pada kecelakaan kilang Texas City (2005).

Pada Tabel 4. Menunjukkan beberapa kecelakaan industri besar menunjukkan bahwa kegagalan dalam pengendalian proses sering kali menjadi faktor dominan dalam terjadinya kecelakaan. Kegagalan tersebut dapat berupa tidak berfungsiya sensor, alarm yang tidak efektif, kesalahan interpretasi data proses, atau ketidakmampuan sistem kontrol menjaga variabel proses dalam batas operasi aman. Studi kasus seperti Bhopal, Texas City, dan Buncefield menunjukkan bahwa penyimpangan kecil pada variabel proses yang tidak terdeteksi atau tidak ditangani dengan tepat dapat berkembang menjadi kecelakaan besar dengan dampak yang luas.

Tabel 4 . Studi Kasus kecelakaan industri yang berkaitan dengan kegagalan pengendalian proses

No	Studi Kasus / Lokasi	Tahun	Kejadian	Permasalahan Pengendalian Proses
1	Flixborough, Inggris	1974	Ledakan pada pabrik caprolactam akibat kebocoran sikloheksana	Modifikasi proses tanpa analisis risiko dan pengendalian tekanan yang memadai
2	Tianjin, Tiongkok	2015	Ledakan gudang bahan kimia	Kegagalan manajemen

			berbahaya	keselamatan proses dan pengendalian penyimpanan bahan kimia
3	Deepwater Horizon, Teluk Meksiko	2010	Ledakan rig pengeboran	Kesalahan interpretasi data tekanan dan kegagalan monitoring kondisi sumur
4	Tesoro Refinery, Washington	2010	Ledakan heat exchanger	Kegagalan monitoring kondisi peralatan dan pengendalian operasi
5	Seveso, Italia	1976	Pelepasan dioksin dari reaktor kimia	Kegagalan pengendalian temperatur reaktor yang menyebabkan runaway reaction

C. KESIMPULAN

Industri kimia memiliki tingkat risiko keselamatan kerja yang tinggi karena melibatkan bahan berbahaya, kondisi operasi ekstrem, dan proses yang kompleks. Pengendalian proses berperan penting dalam menjaga stabilitas operasi serta mencegah kondisi abnormal yang dapat menyebabkan kecelakaan. Integrasi pengendalian proses dengan sistem keselamatan memungkinkan deteksi dini penyimpangan, pengendalian kondisi operasi secara real-time, serta penerapan sistem proteksi berlapis yang efektif dalam menurunkan risiko kecelakaan.

Penerapan integrasi pengendalian proses juga berdampak pada peningkatan keandalan operasi, efisiensi, dan budaya keselamatan industri. Oleh karena itu, industri perlu memperkuat penerapan sistem pengendalian yang terintegrasi, meningkatkan kompetensi sumber daya manusia, serta memanfaatkan teknologi pemantauan dan pengendalian berbasis data. Penelitian lanjut juga diperlukan untuk mengembangkan metode pengendalian yang lebih adaptif dan andal guna mendukung keselamatan proses di industri kimia.

D. DAFTAR PUSTAKA

Ab Rahim, M. S., Reniers, G., Yang, M., & Bajpai, S. (2024). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 88, 105274. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274>

Adnan Syahdi Jalil, A. S. J. (2023). ANALISIS KEGAGALAN START PADA MAIN GENERATOR DI MV OCEAN VENTURE [Diploma, Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar]. <http://eprints.pipmakassar.ac.id/758/>

Behie, S. W., Halim, S. Z., Efaw, B., O'Connor, T. M., & Quddus, N. (2020). Guidance to improve the effectiveness of process safety management systems in operating facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68, 104257. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104257>

Buku Sistem Kontrol—Dr. Zikri Noer, S.Si, M.Si dan Dr. Indri Dayana, M.Si—Google Buku. (n.d.). Retrieved February 11, 2026, from https://books.google.co.id/books?hl=id&lr=&id=wRRNEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=Sensor+yang+digunakan+untuk+mengukur+variabel+proses+seperti+temperatur+dan+tekanan+sering+kali+menjadi+bagian+dari+dua+sistem+sekaligus,+yaitu+sistem+kontrol+dan+sistem+keselamatan,+namun+logika+pengendaliannya+biasanya+dipisahkan+untuk+menjaga+independensi+fungsi+keselamatan+sesuai+prinsip+desain+Safety+Instrumented+System&ots=CmHvUqyhbM&sig=_1Kv_a0bJ0UpTmuV9W1B1YaJYg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Chen, M. (2016). Process Safety Knowledge Management in the Chemical Process Industry. *American Journal of Chemical Engineering*, 4(5), 131. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20160405.16>

Fajriah, I., Ruhdiat, R., Kusmendar, K., Montolalu, I. A., Puspita, N. R., Putri, M. D., Arifin, Y. I., Rusman, R., Jahja, M., Susanti, F., Rahmadani, Y., Gucci, D. O. D. R., Kately, A. R., & Irawan, A. (2026). KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA (K3): TEORI DAN PENERAPANNYA. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah.

Himmel, A., Matschek, J., Kok, R., Morabito, B., Nguyen, H. H., & Findeisen, R. (2023). Machine Learning for Process Control of (Bio)Chemical Processes (arXiv:2301.06073). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.06073>

Laksono, D., & Widanarko, B. (2024). Faktor – Faktor yang Memengaruhi Psychological Safety di dalam Konteks HSE pada Industri Minyak dan Gas Bumi: Literature Review: Media Publikasi Promosi Kesehatan Indonesia (MPPKI), 7(5), 1155–1164. <https://doi.org/10.56338/mppki.v7i5.5189>

Li, S., Zhao, C., & Zhang, L. (2025). Several Issues and Suggestions Regarding the Future Intrinsically Safe Chemical Industrial Park: Insights from Severe Hazardous Chemical Accident Analysis and Industrial Park Field Investigations. *Processes*, 13(11), 3630. <https://doi.org/10.3390/pr13113630>

Parapat, R. Y., A. A. R. N., Bayyanu, B. P., Khodarrohmah, N., Putri, S. R., & Della, S. A. (2026). PENGENDALIAN PROSES EFISIENSI ENERGI: STRATEGI PENGURANGAN KONSUMSI

- ENERGI DAN EMISI. Integrative Perspectives of Social and Science Journal, 3(01 Januari), 507–529.
- Parapat, R. Y., Hudaya, A. I., Balqis, R. A. K., Nugraha, D. B., & Yuniar, A. (n.d.). PROCESS CONTROL IN CHEMICAL PLANTS: A REVIEW OF METHODS AND INDUSTRIAL APPLICATIONS.
- Pratama, M. P., Ariyanto, E., Halimzikri, M. A., Fadilah, R., Shafira, N., Wardani, E., Sintya, G., & Remuso, I. I. (2023). Perancangan Awal Sistem Kontrol Dan Proteksi Reaktor: Studi Kasus Reaktor Dimethylformamide. Jurnal Redoks, 8(2), 104–112. <https://doi.org/10.31851/redoks.v8i2.12647>
- Risked Based Process Safety. (n.d.-a).
- Risked Based Process Safety. (n.d.-b).
- Safety in chemical engineering education | ACS Chemical Health & Safety. (n.d.). Retrieved February 11, 2026, from <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.chas.8b02209>
- Willey, R. J. (2014). Layer of Protection Analysis. Procedia Engineering, 84, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.405>
- Wu, Y., Cao, J., & Cao, Y. (n.d.). Online Learning Control Strategies for Industrial Processes with Application for Loosening and Conditioning.
- Zhang, J., Ai, Z., Guo, L., & Cui, X. (2020). Research of Synergy Warning System for Gas Outburst Based on Entropy-Weight Bayesian: International Journal of Computational Intelligence Systems, 14(1), 376. <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.201214.001>
- Ziani, I., Hassall, M., Maduabuchi, E., Gomes, C., El Bachiri, A., Fauconnier, M.-L., Sher, F., Melnyk, O., Ramírez, C. P., & Spataru, C. (2026). Artificial intelligence in process safety and risk management. In Artificial Intelligence in Chemical Engineering (pp. 383–414). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-34076-5.00011-0>