

Modul Kuliah PERTEMUAN 5

KESELAMATAN PROSES DAN MANAJEMEN LINGKUNGAN

Arti Risiko (Risk) dalam Konteks Keselamatan Proses

Dalam mata kuliah Keselamatan Proses dan Manajemen Lingkungan, **risiko** didefinisikan secara teknis sebagai:

Kombinasi antara frekuensi (probabilitas) terjadinya suatu bahaya dan tingkat keparahan (severitas) dari konsekuensi yang ditimbulkan.

Secara matematis sering ditulis sebagai:

$$\text{RISIKO} = \text{Probabilitas} \times \text{Konsekuensi}$$

- **Probabilitas** = seberapa sering suatu insiden dapat terjadi (misal: 1 kali dalam 10.000 tahun operasi).
- **Konsekuensi** = dampak yang dihasilkan jika insiden terjadi (misal: 5 orang tewas, kerugian \$10 juta, kebakaran selama 2 jam).

Istilah	Definisi	Contoh
Bahaya	Sumber atau situasi yang berpotensi menyebabkan kerugian (bersifat <i>inheren</i>)	Tangki berisi akrilonitril mudah terbakar
Risiko	Ukuran seberapa besar kemungkinan bahaya tersebut benar-benar menyebabkan kerugian	Tangki tersebut bocor 1x/50 tahun → risiko kebakaran kategori "Sedang"

Contoh Praktis

- Sebuah pipa berisi gas H₂S (beracun) pada tekanan 20 bar → **bahaya**.
- Jika pipa tersebut sudah berkarat, tidak pernah diinspeksi, dan berada di dekat area kerja → **risiko tinggi**.
- Jika pipa dilapisi anti-korosi, ada sensor kebocoran, dan jarak aman → **risiko rendah**, meskipun bahayanya tetap ada.

1. Framework ISO 31000:2018 – Prinsip, Kerangka, dan Proses

ISO 31000:2018 merupakan standar internasional yang memberikan panduan komprehensif tentang manajemen risiko. Standar ini tidak bersifat sertifikasi, melainkan sebuah **kerangka acuan** yang dapat diintegrasikan ke dalam sistem manajemen organisasi apa pun, termasuk industri proses kimia (ISO 31000:2018). Standar ini menekankan bahwa manajemen risiko harus menjadi bagian dari **governance, kepemimpinan, dan budaya organisasi**. Kerangka kerja ISO 31000:2018 dibangun di atas tiga pilar utama: Prinsip, Kerangka (Framework), dan Proses.

1.1 Prinsip Manajemen Risiko

ISO 31000:2018 mengidentifikasi **delapan prinsip** yang harus melekat dalam setiap aktivitas manajemen risiko. Prinsip-prinsip ini bukan sekadar klausul administratif, melainkan filosofi yang harus dihayati oleh setiap insinyur kimia.

1. **Terintegrasi (Integrated)** – Manajemen risiko bukan fungsi terpisah, tetapi melekat dalam semua aktivitas organisasi, termasuk perancangan proses, operasi, pemeliharaan, dan pengambilan keputusan strategis.
2. **Terstruktur dan Menyeluruh (Structured and Comprehensive)** – Pendekatan sistematis dan tepat waktu berkontribusi pada hasil yang konsisten, andal, dan dapat dibandingkan.

3. **Disesuaikan (Customized)** – Kerangka kerja dan proses manajemen risiko harus disesuaikan dengan konteks eksternal dan internal organisasi serta profil risikonya.
4. **Inklusif (Inclusive)** – Keterlibatan pemangku kepentingan yang tepat memungkinkan mereka untuk dipahami dan dipertimbangkan dalam menetapkan kriteria risiko dan pengambilan keputusan.
5. **Dinamis (Dynamic)** – Risiko dapat berubah seiring perubahan konteks eksternal dan internal. Manajemen risiko harus peka dan responsif terhadap perubahan tersebut.
6. **Menggunakan Informasi Terbaik yang Tersedia (Best Available Information)** – Input untuk manajemen risiko didasarkan pada informasi historis, pengalaman, umpan balik pemangku kepentingan, observasi, perkiraan, dan opini ahli. Informasi harus tepat waktu, jelas, dan terkini.
7. **Mempertimbangkan Faktor Manusia dan Budaya (Human and Cultural Factors)** – Keterbatasan, persepsi, dan asumsi manusia serta faktor budaya dapat secara signifikan mempengaruhi pencapaian tujuan organisasi.
8. **Mendorong Perbaikan Berkelanjutan (Continual Improvement)** – Manajemen risiko harus terus dievaluasi dan ditingkatkan melalui pembelajaran dan pengalaman.

Prinsip-prinsip ini menjadi fondasi bagi kerangka kerja yang akan kita bahas selanjutnya.

1.2 Kerangka (Framework)

Kerangka kerja dalam ISO 31000:2018 bertujuan untuk membantu organisasi mengintegrasikan manajemen risiko ke dalam aktivitas dan fungsi penting. Komponen utama kerangka ini meliputi: **kepemimpinan dan komitmen, integrasi, desain, implementasi, evaluasi, serta perbaikan**. Kerangka ini bersifat iteratif, artinya organisasi harus secara berkala meninjau dan menyempurnakan pendekatan manajemen risikonya. Dalam konteks pabrik kimia, kerangka ini akan menentukan bagaimana kebijakan keselamatan proses diturunkan menjadi prosedur operasi standar, bagaimana wewenang dan tanggung jawab didelegasikan, dan bagaimana sumber daya dialokasikan untuk pengendalian risiko.

1.3 Proses Manajemen Risiko

Proses inilah yang paling sering berinteraksi langsung dengan para engineer. Proses ini terdiri dari beberapa langkah berurutan:

1. **Komunikasi dan Konsultasi (Communication & Consultation)** – Melibatkan pemangku kepentingan internal dan eksternal di setiap tahap.
2. **Penetapan Konteks (Establishing the Context)** – Mendefinisikan parameter eksternal, internal, dan kriteria risiko.
3. **Penilaian Risiko (Risk Assessment)** – Yang mencakup tiga sub-langkah:

- **Identifikasi Risiko (Risk Identification):** Mencari, mengenali, dan mendeskripsikan risiko.
 - **Analisis Risiko (Risk Analysis):** Memahami sifat dan tingkat risiko, termasuk besaran konsekuensi dan probabilitas.
 - **Evaluasi Risiko (Risk Evaluation):** Membandingkan hasil analisis dengan kriteria risiko untuk menentukan tindakan prioritas.
4. **Perlakuan Risiko (Risk Treatment):** Memilih dan menerapkan opsi untuk memodifikasi risiko.
 5. **Pemantauan dan Peninjauan (Monitoring & Review):** Memastikan efektivitas dan menangkap perubahan.
 6. **Pencatatan dan Pelaporan (Recording & Reporting):** Mendokumentasikan proses dan hasil.

Kerangka ini memastikan bahwa kita tidak hanya sekadar “mengisi matriks”, tetapi benar-benar menjalankan siklus manajemen risiko secara utuh dan berkelanjutan. Setelah memahami kerangka besar, kita akan masuk ke jantung dari proses penilaian risiko: **identifikasi bahaya**.

2. Identifikasi Bahaya: What-If Analysis dan Checklist

Identifikasi bahaya (hazard identification) adalah langkah paling kritis dalam keselamatan proses. Jika kita melewatkan suatu bahaya pada tahap identifikasi, maka bahaya tersebut akan tetap laten dan berpotensi menjadi bencana di kemudian hari. Dua metode identifikasi bahaya yang paling

praktis dan umum digunakan di industry proses adalah **What-If Analysis** dan **Checklist**.

2.1 What-If Analysis

What-If Analysis adalah metode **brainstorming terstruktur** di mana tim ahli mengajukan pertanyaan-pertanyaan spekulatif untuk mengantisipasi skenario penyimpangan dari kondisi operasi normal.

Bentuk pertanyaan dasar adalah: **“Apa yang terjadi jika ...?”**.

Langkah-langkah pelaksanaan What-If Analysis adalah sebagai berikut:

1. **Definisi Ruang Lingkup:** Tentukan batasan sistem, proses, atau fasilitas yang akan dianalisis. Sertakan diagram alir proses (PFD) dan diagram pipa dan instrumentasi (P&ID).
2. **Pembentukan Tim:** Kumpulkan para ahli dari berbagai disiplin ilmu: engineering proses, operasi, pemeliharaan, keselamatan, dan instrumentasi.
3. **Brainstorming Pertanyaan “What-If”:** Tim secara kolaboratif mengajukan pertanyaan untuk setiap node/unit operasi. Contoh: *“Apa yang terjadi jika pompa umpan tiba-tiba mati?”*, *“Apa yang terjadi jika operator gagal menutup katup isolasi?”*, *“Apa yang terjadi jika pendingin padam pada reaktor eksotermis?”*.
4. **Evaluasi dan Penilaian Risiko:** Untuk setiap jawaban, tim menilai konsekuensi, penyebab yang mungkin, serta pengendalian yang ada.

5. **Pengembangan Rekomendasi:** Tentukan rekomendasi untuk mengurangi risiko, baik melalui desain ulang, penambahan pengendalian, maupun revisi prosedur.
6. **Prioritas dan Penugasan Tindak Lanjut:** Rekomendasi diprioritaskan berdasarkan tingkat risiko dan diberikan penanggung jawab serta batas waktu.

Keunggulan What-If Analysis adalah **fleksibilitasnya** yang tinggi – cocok untuk sistem sederhana hingga kompleks. Namun metode ini sangat bergantung pada **pengalaman dan kreativitas tim**. Di sinilah Checklist Analysis berperan sebagai pelengkap yang sangat baik.

2.2 Checklist Analysis

Checklist adalah metode identifikasi bahaya yang berbasis pada **daftar terstruktur** yang berisi item-item potensi bahaya atau pertanyaan tentang kepatuhan terhadap standar yang berlaku. Checklist biasanya dikembangkan dari:

- Standar industri (API, NFPA, ANSI, ASME, dll.)
- Peraturan pemerintah (OSHA, EPA, BAPEDAL)
- Pelajaran dari kecelakaan masa lalu (database insiden)
- Pengalaman operasional puluhan tahun.

Sebuah checklist yang baik tidak hanya berisi “ya/tidak”, tetapi juga memberikan panduan konsekuensi jika standar tidak terpenuhi. **Integrated Hazard Identification (IHI)** yang memadukan metode What-If dan Checklist kini semakin populer di kalangan praktisi, karena pendekatan

hibrida ini menggabungkan kekuatan brainstorming kreatif dengan jaring pengaman standar yang sistematis.

Dalam praktik lapangan, mulai dengan **What-If Analysis** terlebih dahulu untuk menangkap skenario unik yang mungkin tidak tercakup dalam checklist standar. Kemudian, gunakan **Checklist** sebagai verifikasi akhir untuk memastikan tidak ada bahaya dari aspek kepatuhan yang terlewat. Skenario yang telah diidentifikasi kemudian akan dianalisis lebih lanjut menggunakan **Risk Matrix**.

3. Risk Matrix (5×5): Likelihood × Severity

Setelah bahaya teridentifikasi, kita harus mengukur seberapa “besar” risikonya. Alat yang paling mudah dipahami dan cepat diterapkan di tingkat operasional adalah **Risk Matrix** (atau biasa disebut matriks risiko). Risk matrix adalah alat visual yang memplotkan dua dimensi utama risiko: **Likelihood (kemungkinan)** pada satu sumbu dan **Severity (keparahan konsekuensi)** pada sumbu lainnya. Perpotongan kedua sumbu ini menghasilkan **level risiko** (rendah, sedang, tinggi, sangat tinggi).

Dalam industri proses, matriks 5×5 (lima tingkat likelihood × lima tingkat severity) adalah yang paling umum digunakan karena memberikan keseimbangan antara granularitas yang cukup untuk pengambilan keputusan dan kemudahan pelaksanaan.

3.1 Skala Likelihood (5 tingkat)

Skala likelihood menggambarkan seberapa sering suatu skenario kecelakaan diperkirakan terjadi selama umur operasi fasilitas.

Tingkat	Label	Kriteria Kuantitatif (Frekuensi/Tahun)	Kriteria Kualitatif
5	Hampir Pasti	$>10^{-1}$	Telah terjadi dalam 12 bulan terakhir
4	Sering	$10^{-1} - 10^{-2}$	Telah terjadi dalam 24 bulan terakhir
3	Kadang-kadang	$10^{-2} - 10^{-3}$	Telah terjadi dalam 36 bulan terakhir
2	Jarang	$10^{-3} - 10^{-4}$	Telah terjadi, tapi tidak dalam 5 tahun terakhir
1	Sangat Jarang	$<10^{-4}$	Belum pernah terjadi di industri sejenis

Catatan: Rentang frekuensi di atas adalah contoh umum. Setiap perusahaan dapat menyesuaikan rentangnya berdasarkan tolok ukur industri masing-masing.

3.2 Skala Severity (5 tingkat)

Skala severity menggambarkan tingkat keparahan konsekuensi jika suatu skenario bahaya benar-benar terjadi. Dalam keselamatan proses, kita umumnya mengevaluasi tiga dampak utama: **keselamatan manusia, kerusakan aset, dan lingkungan.**

Tingkat	Label	Dampak terhadap Manusia	Dampak terhadap Aset	Dampak terhadap Lingkungan
5	Bencana	Kematian ≥ 1 orang; cacat permanen total	Kerugian $> \$10M$; pabrik hancur total	Pelepasan besar (pencemaran parah, dampak ekosistem luas)
4	Berat	Cacat permanen sebagian; rawat inap ≥ 3 orang	Kerugian $1M-10M$; kerusakan signifikan	Pelepasan lokal signifikan, perlu upaya pembersihan besar

3	Sedang	Cedera serius (patah tulang, luka bakar) rawat inap 1-2 orang	Kerugian 100k-1 M; kerusakan sedang	Pelepasan terbatas, dapat ditangani internal
2	Ringan	Cedera ringan, perawatan medis di lokasi (P3K, lost time injury 1-3 hari)	Kerugian 10k-100k; kerusakan minor	Pelepasan kecil, tidak perlu tindakan pembersihan khusus
1	Sangat Ringan	Tidak ada cedera atau hanya first aid tanpa lost time	Kerugian < \$10k; kerusakan sangat kecil/tidak ada	Tidak ada pelepasan signifikan

3.3 Matriks Risiko 5×5

Berikut adalah contoh matriks 5×5 dengan pembacaan level risiko (L = Low, M = Medium, H = High, E = Extreme).

Severity (S) ↓ Likelihood (L) →	L=1 (Sangat Jarang)	L=2 (Jarang)	L=3 (Kadang)	L=4 (Sering)	L=5 (Hampir Pasti)
S=5 (Bencana)	Medium (M)	High (H)	High (H)	Extreme (E)	Extreme (E)
S=4 (Berat)	Low (L)	Medium (M)	High (H)	High (H)	Extreme (E)
S=3 (Sedang)	Low (L)	Low (L)	Medium (M)	High (H)	High (H)
S=2 (Ringan)	Low (L)	Low (L)	Medium (M)	Medium (M)	Medium (M)
S=1 (Sangat Ringan)	Low (L)	Low (L)	Low (L)	Low (L)	Low (L)

Interpretasi Level Risiko:

- **E (Extreme):** Risiko tidak dapat ditoleransi. Operasi tidak boleh berlanjut/berizin sampai tindakan

pengendalian signifikan diterapkan. Perlu otorisasi dari manajemen puncak.

- **H (High):** Risiko tidak diinginkan. Perlu tindakan segera untuk menurunkan risiko ke setidaknya level medium. Prioritas tinggi dalam rencana mitigasi.
- **M (Medium):** Risiko dapat ditoleransi dengan syarat dipantau dan adanya rencana perbaikan. Tindakan remedial direkomendasikan.
- **L (Low):** Risiko dapat diterima dengan pengendalian rutin yang ada. Tidak perlu tindakan khusus, tetapi tetap dipantau.

Penggunaan risk matrix akan lebih bermakna jika kita memadukannya dengan pencatatan yang sistematis, yaitu melalui **Risk Register**.

4. Risk Register dan Risk Ranking

4.1 Risk Register

Risk register (atau daftar risiko) adalah dokumen hidup (living document) yang menjadi pusat pengelolaan risiko di suatu fasilitas. Risk register mencatat setiap skenario risiko yang telah diidentifikasi beserta seluruh atributnya. Struktur minimal risk register di industri kimia umumnya mencakup:

- 1. ID Risiko (unik identifier)**
- 2. Deskripsi Skenario Bahaya/Kejadian Awal**
- 3. Penyebab (Root Causes & Contributing Factors)**
- 4. Konsekuensi (untuk manusia, aset, lingkungan, reputasi)**

5. **Pengendalian yang Telah Ada (existing controls)**
6. **Likelihood sebelum mitigasi (raw likelihood)**
7. **Severity sebelum mitigasi (raw severity)**
8. **Level Risiko Awal (raw risk level)**
9. **Rekomendasi Tindakan Mitigasi**
10. **Likelihood setelah mitigasi (residual likelihood)**
11. **Severity setelah mitigasi (residual severity)**
12. **Level Risiko Sisa (residual risk level)**
13. **Penanggung Jawab & Target Penyelesaian**
14. **Status Tindak Lanjut (open/closed/in progress)**

Risk register memastikan bahwa setiap bahaya yang sudah diidentifikasi **tidak hilang atau terlupakan**. Ia menjadi alat audit, alat komunikasi antara departemen, dan bukti tertulis bagi regulator bahwa perusahaan mengelola risikonya secara sistematis.

4.2 Risk Ranking

Risk ranking adalah proses mengurutkan skenario-skenario risiko dalam risk register berdasarkan **tingkat risikonya** (biasanya dari yang paling tinggi ke paling rendah). Tujuan utama risk ranking adalah untuk **mengalokasikan sumber daya yang terbatas** secara efisien, karena tidak semua risiko dapat ditangani sekaligus.

Dalam praktiknya, risk ranking dapat dilakukan dengan **mengalikan nilai numerik likelihood dengan severity** (misal $L \times S$ menghasilkan skor 1-25), lalu diurutkan. Namun lebih baik pendekatan **multi-kriteria**

risk ranking untuk industri proses, di mana risiko untuk manusia, aset, lingkungan, dan reputasi diberi bobot yang berbeda sesuai dengan nilai dan profil risiko perusahaan. Dari hasil risk ranking inilah rekomendasi tindakan mitigasi disusun prioritasnya. Proses menentukan tindakan mitigasi ini mengarah pada konsep fundamental berikutnya: **ALARP**.

5. Konsep ALARP (As Low As Reasonably Practicable)

ALARP adalah konsep sentral dalam keselamatan proses dan rekayasa risiko. Prinsip ini menyatakan bahwa risiko harus dikelola hingga “**serendah yang dapat dicapai secara layak dan praktis**” (As Low As Reasonably Practicable). Inti ALARP adalah pengakuan bahwa **risiko tidak dapat dikurangi menjadi nol mutlak**. Fokusnya adalah menyeimbangkan upaya pengurangan risiko (termasuk biaya, waktu, dan kesulitan teknis) dengan manfaat keselamatan yang diperoleh.

Dalam kerangka ALARP, wilayah risiko dibagi menjadi tiga zona:

- 1. Zona Tidak Dapat Diterima (Intolerable Region):** Tingkat risiko sangat tinggi. Apapun biaya atau kesulitannya, risiko harus dikurangi, tanpa terkecuali. Tidak ada kompromi.
- 2. Zona ALARP (Tolerable / Broadly Acceptable):** Tingkat risiko berada di antara dua batas. Di sinilah terjadi optimalisasi. Perusahaan dituntut untuk menurunkan risiko hingga “**reasonably practicable**” . Artinya, jika suatu tindakan

pengendalian **dapat** menurunkan risiko dan **biaya, waktu, serta usaha yang dikeluarkan tidak sangat tidak proporsional dengan manfaat keselamatan yang diperoleh**, maka tindakan tersebut **harus** diterapkan.

3. **Zona Dapat Diterima secara Luas (Broadly Acceptable Region):** Tingkat risiko sangat rendah, tidak perlu tindakan lebih lanjut, namun tetap dipantau.

Pertanyaan kunci untuk menilai apakah suatu risiko sudah “ALARP” adalah: **“Apakah masih ada langkah pengendalian lain yang secara teknis dan operasional layak untuk diterapkan, dan yang biayanya (dalam arti luas termasuk beban mental dan operasional) tidak benar-benar tidak sebanding dengan pengurangan risiko yang dicapai?”** . Jika jawabannya “ya” (artinya ada tindakan lain yang layak dan biayanya tidak tidak timpang), maka risiko belum ALARP dan kita harus melakukan lebih banyak upaya mitigasi. Proses ini melibatkan dialog teknis antara engineer, manajer operasi, dan function safety.

Implementasi ALARP dalam industri kimia biasanya menggunakan alat seperti **Cost-Benefit Analysis (CBA)** yang disederhanakan atau **Gross Disproportion Factor (GDF)**. Namun fondasi utamanya tetap logika teknis dan etika profesional seorang insinyur. Untuk menurunkan risiko ke tingkat ALARP, kita perlu peta jalan yang jelas tentang **opsi-opsi tindakan** yang tersedia. Peta jalan itu adalah **Hierarki Pengendalian Risiko**.

6. Hierarki Pengendalian Risiko

Hierarki pengendalian risiko (risk control hierarchy) adalah urutan pilihan tindakan mitigasi dari yang paling efektif secara fundamental hingga yang paling tidak permanen dan paling bergantung pada perilaku manusia. Urutan ini harus diikuti dengan disiplin tinggi oleh tim perancang maupun operator.

Tingkat	Metode	Penjelasan	Contoh di Industri Kimia
1 (Paling Efektif)	Eliminasi	Menghilangkan bahaya fisik dari sistem. Tidak ada lagi paparan, risiko hilang. Satu-satunya metode yang menghilangkan risiko sepenuhnya	Merancang proses tanpa menggunakan bahan baku beracun atau sangat reaktif.
2	Substitusi	Mengganti bahan/alat/proses dengan yang kurang berbahaya. Risiko berkurang drastis, tetapi bahaya	Mengganti pelarut benzena dengan pelarut dengan toksisitas lebih rendah; mengganti refrigeran

		mungkin masih ada.	beracun dengan yang aman.
3	Rekayasa Teknik (Engineering Controls)	Mengisolasi orang dari bahaya melalui desain fisik: pelindung, ventilasi, interlock, pressure relief, bund wall. Bahaya tetap tetapi paparan dicegah.	Scrubber untuk menangkap gas beracun; sistem inerting pada reaktor; pressure relief valve (PSV) yang dibuang ke flare.
4	Administrasi (Administrative Controls)	Mengubah perilaku manusia melalui prosedur, pelatihan, pengawasan, rambu, izin kerja. Paling bergantung pada kepatuhan.	Prosedur operasi standar (SOP); perizinan kerja panas; rotasi shift untuk mengurangi kelelahan; fatwa lockout/tagout.

5 (Paling bergantung pada manusia & paling tidak permanen)	Alat Pelindung Diri (APD)	Melengkapi pekerja dengan peralatan pelindung yang mengurangi dampak jika terpapar. Bahaya dan paparan tidak dihilangkan.	Respirator, baju tahan kimia (chemical suit), sarung tangan tahan asam, sepatu safety, kaca mata pelindung.
--	---------------------------	---	---

Pedoman praktis : selalu mulai dari **Eliminasi** (tanya: *apakah kita bisa merancang proses tanpa bahaya ini?*), baru turun ke Substitusi, dst. Jangan pernah memulai dari APD, karena APD adalah pengakuan bahwa kegagalan pengendalian tingkat atas diperbolehkan. Industri yang baik menggunakan **defense-in-depth**, yaitu beberapa lapisan pengendalian independen dari berbagai tingkat hierarki. Setelah pengendalian dipilih, kita perlu menentukan seberapa dalam analisis risiko yang akan dilakukan, yang membawa kita pada perbedaan antara risiko **kualitatif, semi-kuantitatif, dan kuantitatif (QRA)**.

7. Risiko Kualitatif vs. Semi-Kuantitatif vs. Kuantitatif (QRA)

Tidak semua risiko perlu dianalisis dengan metode yang sama. Pemilihan tingkat kuantifikasi tergantung

pada **kompleksitas, tingkat risiko awal, dan kebutuhan pengambilan keputusan.**

7.1 Risiko Kualitatif

Metode yang paling sederhana dan paling cepat. Risiko dinyatakan dalam kategori deskriptif (misal: rendah, sedang, tinggi) tanpa angka eksak. Contohnya adalah *Risk Matrix 5×5* yang sudah kita bahas sebelumnya. Pendekatan kualitatif cocok untuk **penilaian awal (screening)** atau **skenario dengan konsekuensi rendah hingga sedang.** Kelemahannya adalah subjektivitas dan kurangnya ketajaman untuk membandingkan dua skenario dengan tingkat risiko yang mirip.

7.2 Risiko Semi-Kuantitatif

Metode ini memberikan angka ordinal (peringkat) pada likelihood dan severity, kemudian **menggabungkannya secara aritmetik** (biasanya perkalian atau penjumlahan). Hasilnya berupa angka yang lebih tajam daripada kategori kualitatif, tetapi tidak memiliki makna fisika yang sesungguhnya (misal: skor 12 tidak berarti 12 kali lebih berbahaya dari skor 6). **SWIFRA** (Structured What-If Risk Assessment) adalah contoh metode semi-kuantitatif yang modern, karena menggunakan multiple questioning (what, how, why) untuk memperkuat penilaian risiko. Pendekatan semi-kuantitatif banyak dipakai untuk **prioritisasi internal** dan studi HAZOP tingkat lanjut.

7.3 Risiko Kuantitatif (QRA - Quantitative Risk Assessment)

Ini adalah tingkat analisis risiko tertinggi dan paling kredibel. QRA menghitung **nilai risiko numerik yang memiliki interpretasi fisika**, misalnya:

- **Individual Risk (IR):** probabilitas kematian per orang per tahun (misal 10^{-5} per tahun).
- **Societal Risk:** hubungan antara frekuensi dan jumlah korban jiwa (ditampilkan dalam kurva F-N yang dibandingkan dengan batas toleransi ALARP).

QRA menggabungkan **consequence modeling** (dispersi gas, kebakaran, ledakan) dan **frequency analysis** (data kegagalan komponen, fault tree analysis, event tree analysis). QRA memerlukan data yang sangat rinci dan keahlian khusus, sehingga biasanya diterapkan pada **skenario dengan konsekuensi bencana** (misal: pemukiman padat di sekitar pabrik yang menyimpan klorin dalam jumlah besar) atau untuk **demonstrasi ALARP secara kuantitatif** di hadapan regulator. Hasil QRA dapat menginformasikan keputusan fasilitas siting, jarak evakuasi, dan desain sistem darurat.

Panduan Memilih Metode:

- **Risiko Low - Medium:** Cukup dengan **kualitatif** (Risk Matrix).
- **Risiko Medium - High (kompleksitas sedang):** Gunakan **semi-kuantitatif** (SWIFRA, LOPA).

- **Risiko High - Extreme** atau untuk demonstrasi **ALARP**: Lakukan **QRA** dengan bantuan perangkat lunak konsekuensi.

8. Studi Kasus dari Video YouTube (CSB Investigations) + Tabel Risk Matrix

Untuk membumikan semua konsep di atas, mari kita analisis tiga kecelakaan nyata yang didokumentasikan dalam video animasi oleh **U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB)**. Video-video ini dapat diakses di kanal YouTube **@USCSB**. Menonton rekonstruksi kecelakaan dalam animasi adalah salah satu cara paling efektif untuk memahami rantai kesalahan mulai dari identifikasi bahaya hingga implementasi pengendalian yang gagal.

Kasus 1: Pencampuran Bahan Kimia Tidak Sesuai - Atchison, KS (2016)

- **Sumber Video CSB**: "Investigation Update: Chemical Release" (2018) – tersedia di kanal YouTube USCSB.
- **Ringkasan Kejadian**: Pada 21 Oktober 2016, di sebuah fasilitas pemrosesan kimia di Atchison, Kansas, terjadi pencampuran yang tidak disengaja antara **asam sulfat** (yang sedang diantarkan melalui truk tangki) dengan **natrium hipoklorit (pemutih)** yang tertinggal di dalam sistem perpipaan. Reaksi eksotermis yang cepat menghasilkan **awan gas klorin dan senyawa lainnya** (Cl_2 , ClO_2 , H_2S , dll.). Awan tersebut menyebar ke area kerja dan pemukiman sekitar. Lebih dari 140

orang mencari pertolongan medis, 6 orang dirawat di rumah sakit, dan ribuan warga diperintahkan untuk *shelter in place* atau dievakuasi.

- **Identifikasi Bahaya (What-If & Checklist):** Tim investigasi CSB menemukan bahwa prosedur identifikasi bahaya di fasilitas tersebut **tidak mempertanyakan skenario “Apa yang terjadi jika kendaraan pengantar terhubung ke jalur yang salah?”**. Selain itu, checklist kompatibilitas bahan kimia antar-substansi sangat minim. Inkompatibilitas antara asam kuat dengan hipoklorit seharusnya diketahui sebagai bahaya reaktif yang sangat tinggi.

Tabel Risk Matrix 5×5 untuk Kasus 1 (Sebelum Mitigasi)

Parameter	Penilaian & Justifikasi
Skenario Bahaya	Pencampuran tidak sengaja antara asam sulfat dan natrium hipoklorit → reaksi cepat → pelepasan gas klorin.
Likelihood (L)	3 (Kadang-kadang) – Kejadian ini tidak terlalu jarang di industri pengolahan air dan pemrosesan kimia; telah terjadi beberapa kali di lokasi serupa, termasuk di fasilitas dengan sistem koneksi truk yang mirip.
Severity (S)	4 (Berat) – Meskipun tidak ada kematian langsung, konsekuensi terhadap kesehatan cukup besar:

	rawat inap, gangguan pernapasan berat, dan potensi kecacatan permanen parsial akibat paparan klorin dosis tinggi. Area terdampak sangat luas (komunitas).
Level Risiko Awal	$L \times S = 3 \times 4 = 12 \rightarrow \text{High (H)}$ (menurut matriks 5×5, skor 12–16 masuk kategori High jika mengacu contoh pembobotan pada Tabel 2 dalam modul asli, atau Extreme pada batasan yang lebih ketat).
Kategori Risiko	High (mendekati Extreme) – Risiko tidak dapat ditoleransi; memerlukan tindakan segera.
Prinsip ALARP	Belum tercapai, karena pengendalian yang efektif (pemisahan jalur, sistem kunci ganda) secara teknis layak dan tidak terlalu mahal dibanding potensi bencana.
Hierarki Pengendalian yang Direkomendasikan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eliminasi: Desain ulang sistem pengiriman bahan kimia sehingga tidak ada koneksi fisik antara truk asam dengan jalur hipoklorit, misalnya dengan konektor unik. 2. Rekayasa: Pasang <i>check valve</i> dan sistem interlock yang memverifikasi kompatibilitas sebelum aliran dimulai. 3. Administrasi: Prosedur <i>two-person verification</i> sebelum

	menyambung selang dan pelatihan tentang bahaya reaktif. 4. APD: Tidak efektif untuk skala pelepasan seperti ini; warga sekitar tidak bisa bergantung pada APD.
Level Risiko Sisa (Setelah Mitigasi)	L = 1 (Sangat jarang, karena interlock memblokir koneksi salah), S = 4 (konsekuensi masih berat jika terjadi), $L \times S = 4 \rightarrow$ Medium (M) . Risiko masih ada tetapi dapat diterima dengan pengendalian yang kuat.

Kasus 2: Pelepasan Etilena dan Kebakaran – Kuraray America, Pasadena, TX (2018)

- **Sumber Video CSB:** “Ethylene Release and Fire at Kuraray America” (2022) – tersedia di kanal YouTube USCSB.
- **Ringkasan Kejadian:** Pada 2018, di pabrik EVAL Kuraray America, terjadi pelepasan gas etilena yang mudah terbakar dari sistem *emergency pressure relief* (PSV) pada reaktor. Gas etilena dikeluarkan melalui pipa yang mengarah secara horizontal, tepat di area yang terdapat pekerja. Gas tersebut terbakar, menyebabkan **23 pekerja cedera**, dua di antaranya

harus diangkut dengan helikopter dan satu dalam kondisi kritis karena luka bakar.

- **Identifikasi Bahaya:** CSB mengidentifikasi 17 kegagalan sistem keselamatan proses. Yang paling mengemuka adalah desain **lokasi pelepasan PSV yang tidak aman** (discharge gas panas dan mudah terbakar ke area dengan personel non-esensial selama *startup*). What-If Analysis pada pabrik tersebut seharusnya mengajukan pertanyaan: “*Apa yang terjadi jika PSV terbuka pada saat ada personel di dekatnya?*” yang tidak pernah ditanyakan.

Tabel Risk Matrix 5×5 untuk Kasus 2 (Sebelum Mitigasi)

Parameter	Penilaian & Justifikasi
Skenario Bahaya	PSV melepaskan gas etilena yang mudah terbakar ke area dengan personel; percikan api atau panas menyebabkan kebakaran jet.
Likelihood (L)	3 (Kadang-kadang) – Frekuensi PSV terbuka sekitar 10^{-3} – 10^{-2} per tahun tergantung pada keandalan sistem kendali. Startup adalah fase risiko tinggi, tetapi peristiwa pelepasan fatal jarang terjadi. CSB mencatat bahwa PSV telah terbuka sebelumnya dalam kondisi serupa tanpa kebakaran yang melukai; kejadian ini adalah yang pertama kali berakibat parah. Dengan pendekatan konservatif, kita beri L=3.

Severity (S)	5 (Bencana) – Etilena sangat mudah terbakar; kebakaran jet dapat menyebabkan kematian atau cacat permanen total (luka bakar derajat 3 di tubuh luas). Jika PSV melepaskan gas ke arah yang lebih padat personel, potensi banyak korban jiwa sangat nyata. Dalam kejadian ini, meskipun tidak ada korban jiwa, dua orang mengalami luka kritis dan hampir kehilangan nyawa, sehingga severity mengarah ke level 5 (bencana).
Level Risiko Awal	$L \times S = 3 \times 5 = 15 \rightarrow$ Extreme (E) (skor 15–25 masuk kategori Extreme).
Kategori Risiko	Extreme – Tidak dapat diterima dalam kondisi apapun. Operasi reaktor harus dihentikan sampai sistem pelepasan aman dirancang ulang.
Prinsip ALARP	Jelas tidak tercapai, karena solusi teknis (PSV yang diarahkan ke flare atau ke lokasi yang aman dan jauh dari personel serta bangunan) telah dikenal luas dalam praktik rekayasa yang baik.
Hierarki Pengendalian	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eliminasi: Desain proses yang inherently safer sehingga PSV tidak perlu terbuka dalam skenario startup abnormal. 2. Rekayasa: Arahkan semua pelepasan PSV ke sistem <i>flare</i> atau ke lokasi tertutup buangan yang aman (misal: vent stack tinggi dengan pembakaran). 3. Administrasi: Larangan keberadaan

	personel non-esensial di area bahaya saat PSV mungkin aktif (misal: peta evakuasi sementara).
Level Risiko Sisa	Dengan pelepasan ke <i>flare</i> , L dapat turun drastis menjadi L=2 (Jarang, karena kegagalan flare dapat terjadi tetapi kecil), S tetap 5 (jika flare gagal maka konsekuensi masih bencana), $L \times S = 10 \rightarrow$ High (H) . Risiko kemudian dievaluasi lagi apakah sudah ALARP.

Kasus 3: Ledakan *Resin Kettle* – Yenkin-Majestic, Columbus, OH (2021)

- **Sumber Video CSB:** “Fatal Resin Kettle Explosion” (2025) – tersedia di kanal YouTube USCSB. Video ini telah ditonton sekitar 350.000 kali.
- **Ringkasan Kejadian:** Pada April 2021, di fasilitas resin Yenkin-Majestic, seorang pekerja tewas, delapan lainnya luka-luka, dan kebakaran berlangsung lebih dari 11 jam* setelah ledakan uap (vapor explosion) pada bejana resin bertekanan rendah. Investigasi CSB menemukan bahwa pelarut yang mudah terbakar secara tidak sengaja ditambahkan ke dalam bejana yang agitator-nya (pengaduk) tidak berfungsi. Pelarut mengapung di atas resin panas. Saat agitator dihidupkan kembali, pelarut bercampur secara tiba-tiba, menguap dengan cepat, menciptakan tekanan yang melampaui batas tekan *manway* (lubang perawatan) yang baru dipasang

namun tidak diuji tekanan secara memadai. Manway tersebut gagal, menyebabkan awan uap menyala dan meledak.

- **Identifikasi Bahaya:** Isu yang paling kritis adalah **lemahnya integritas mekanik bejana bertekanan rendah** dan **kurangnya engineered safeguards** untuk mencegah urutan penambahan pelarut yang tidak benar sebelum agitator dihidupkan.

Tabel Risk Matrix 5×5 untuk Kasus 3 (Sebelum Mitigasi)

Parameter	Penilaian & Justifikasi
Skenario Bahaya	Penambahan pelarut yang mudah menguap ke dalam bejana yang berisi resin panas dengan agitator mati; agitator dihidupkan → pencampuran cepat → penguapan masif → tekanan berlebih → kebocoran manway → awan uap terbakar/ledakan.
Likelihood (L)	2 (Jarang) – Skenario kegagalan ganda ini (pelarut ditambahkan, agitator mati, manway tidak teruji, dan prosedur start-up tidak diikuti) memerlukan beberapa kondisi yang bersamaan. Dalam sejarah pabrik ini, kejadian seperti ini belum pernah terjadi sebelumnya (terisolasi). Namun jika prosedur operasional sangat longgar, frekuensi dapat naik ke L=3. Dengan informasi yang tersedia, kita beri L=2.

Severity (S)	5 (Bencana) – Ledakan uap dalam skala seperti ini mengakibatkan satu kematian langsung (seorang pekerja tewas) dan beberapa cedera parah; potensi kerusakan fasilitas luas. Dampak pada manusia jelas level 5.
Level Risiko Awal	$L \times S = 2 \times 5 = 10 \rightarrow$ High (H) (skor 10–14 masuk kategori High pada beberapa sistem, namun pada skala ini dapat dinaikkan menjadi High–Extreme karena meninggal).
Kategori Risiko	High (mendekati Extreme) – Tidak dapat diterima. Perlu segera mengurangi likelihood atau mengurangi konsekuensi.
Prinsip ALARP	Belum terpenuhi, karena ada langkah sederhana (engineered interlock antara agitator dan katup penambahan pelarut) yang secara teknis layak dan biayanya rendah.
Hierarki Pengendalian	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eliminasi: Ubah proses batch menjadi proses semi-batch dengan in-line mixing yang lebih terkendali. 2. Rekayasa: Pasang interlock yang mencegah transfer pelarut ke reaktor jika agitator tidak berputar atau jika suhu resin di atas titik nyala pelarut. 3. Rekayasa: Desain ulang manway dengan faktor keamanan yang sesuai dan uji tekanan berkala.

	4. Administrasi: Prosedur operasi yang ketat dan pelatihan ulang operator.
Level Risiko Sisa	Setelah interlock terpasang dan manway diuji ulang, L dapat turun menjadi 1 (Sangat jarang, karena interlock memblokir penyebab utama). S tetap 5 (jika terjadi, tetap fatal). $L \times S = 5 \rightarrow$ Medium (M) . Risiko sisa ini diterima hanya jika terbukti ALARP (biaya lebih lanjut tidak proporsional).

Selamat belajar, dan jadilah insinyur yang tidak hanya cerdas, tetapi juga bijak dalam mengelola risiko.