

## MODUL PERKULIAHAN

# KESELAMATAN PROSES DAN MANAJEMEN LINGKUNGAN

---

### PERTEMUAN 4

*Investigasi Insiden, Analisis Kegagalan & Pembelajaran  
dari Bencana Industri*

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>Mata Kuliah</b>   | Keselamatan Proses dan Manajemen Lingkungan     |
| <b>Kode / SKS</b>    | CHE7082/ 2SKS                                   |
| <b>Pertemuan Ke-</b> | 4 (Empat)                                       |
| <b>Topik Utama</b>   | Investigasi Insiden & Analisis Kegagalan Sistem |
| <b>Pengampu</b>      | Rinette Visca, S.T.,MSi                         |





### **Setelah mengikuti pertemuan ini, mahasiswa mampu:**

- ▶ Menerapkan metode investigasi insiden: RCA, 5-Why, dan Timeline Analysis secara sistematis
- ▶ Mengkonstruksi Fault Tree Analysis (FTA) menggunakan simbol standar dan logika boolean
- ▶ Membangun Bow-tie Analysis lengkap dengan threat, top event, consequence, dan barrier
- ▶ Menyusun laporan investigasi insiden yang terstruktur sesuai standar internasional
- ▶ Menganalisis pembelajaran dari insiden besar: Texas City (2005) dan Bhopal (1984)
- ▶ Mengaplikasikan metode investigasi pada studi kasus nyata industri kimia



## BAB 1 — METODE INVESTIGASI INSIDEN

Investigasi insiden merupakan fondasi utama keselamatan proses. Tujuannya bukan mencari siapa yang bersalah (blame), melainkan mengidentifikasi akar penyebab (root cause) sehingga kejadian serupa dapat dicegah di masa depan. Tiga metode yang paling banyak digunakan dalam industri proses adalah Root Cause Analysis (RCA), 5-Why Analysis, dan Timeline Analysis.

### 1.1 Root Cause Analysis (RCA)

Root Cause Analysis adalah pendekatan terstruktur untuk menemukan penyebab paling mendasar dari suatu insiden. RCA bukan hanya menjawab 'apa yang terjadi', tetapi menggali lebih dalam: 'mengapa hal itu terjadi' dan 'bagaimana mencegahnya'.

| Lapisan Penyebab   | Definisi                                   | Contoh                             |
|--------------------|--|------------------------------------|
| Direct Cause       | Kejadian langsung yang menyebabkan insiden | Katup relief tidak berfungsi       |
| Contributing Cause | Faktor yang memperburuk situasi            | Tekanan berlebih tidak terdeteksi  |
| Root Cause         | Akar masalah paling mendasar               | Tidak ada prosedur kalibrasi rutin |

|                |                            |                           |
|----------------|----------------------------|---------------------------|
| Systemic Cause | Kelemahan sistem manajemen | Safety culture yang lemah |
|----------------|----------------------------|---------------------------|

### **Langkah-Langkah RCA:**

- Pengumpulan data: Kumpulkan semua fakta, foto, rekaman, dan kesaksian segera setelah kejadian
- Definisi masalah: Nyatakan insiden secara spesifik, terukur, dan tidak ambigu
- Identifikasi kejadian: Susun urutan kejadian dalam timeline kronologis
- Identifikasi penyebab: Gunakan diagram sebab-akibat (Fishbone/Ishikawa)
- Analisis akar penyebab: Telusuri ke level sistem, prosedur, dan budaya
- Rekomendasi: Buat tindakan korektif yang spesifik, terukur, dan bertanggung jawab
- Verifikasi: Pastikan tindakan korektif telah diimplementasikan dan efektif

## **1.2 Metode 5-Why Analysis**

---

5-Why adalah teknik iteratif di mana 'mengapa' (why) ditanyakan berulang kali — umumnya lima kali — untuk menelusuri rantai sebab-akibat hingga ditemukan akar masalah. Metode ini sederhana namun sangat efektif untuk masalah yang memiliki rantai kausal tunggal.

## Contoh Penerapan 5-Why: Kebocoran Pipa di Unit Distilasi

- ▶ Why 1: Mengapa terjadi kebocoran? → Karena pipa mengalami korosi parah
- ▶ Why 2: Mengapa pipa mengalami korosi? → Karena tidak dilakukan inspeksi rutin
- ▶ Why 3: Mengapa inspeksi tidak dilakukan? → Karena jadwal PM tidak mencakup zona tersebut
- ▶ Why 4: Mengapa zona tersebut tidak terjadwal? → Karena klasifikasi risiko zona salah (low risk)
- ▶ Why 5: Mengapa klasifikasi risiko salah? → Karena tidak ada prosedur re-assessment risiko berkala
- ▶ ROOT CAUSE: Sistem manajemen risiko tidak memiliki mekanisme review berkala → PERBAIKI SISTEM!

Keterbatasan 5-Why: Metode ini kurang efektif untuk insiden dengan multi-penyebab kompleks atau ketika tim penyelidik memiliki bias. Pada kasus seperti itu, kombinasi dengan metode lain seperti FTA lebih disarankan.

### 1.3 Timeline Analysis

---

Timeline Analysis menyusun urutan kejadian secara kronologis untuk memvisualisasikan bagaimana insiden berkembang dari waktu ke waktu. Metode ini sangat berguna untuk mengidentifikasi titik-titik kritis di mana intervensi dapat mencegah eskalasi.

| Waktu      | Kejadian                                | Kondisi Sistem        | Peluang Intervensi          |
|------------|---|-----------------------|-----------------------------|
| T-72 jam   | Tekanan vessel mulai naik perlahan      | Tidak ada alarm aktif | Inspeksi rutin (terlewat)   |
| T-24 jam   | Operator mencatat anomali minor di log  | Alarm low-level aktif | Eskalasi ke supervisor      |
| T-4 jam    | Temperatur melonjak 15°C di atas normal | Alarm high aktif      | Shutdown darurat            |
| T-30 menit | Katup safety gagal membuka              | Sistem proteksi gagal | Manual override             |
| T=0        | Ledakan dan kebakaran                   | Catastrophic failure  | Evakuasi/Emergency response |

Komponen penting dalam Timeline Analysis mencakup: (1) Waktu tepat setiap kejadian, (2) Aktor yang terlibat, (3) Kondisi sistem saat itu, (4) Tindakan yang diambil atau tidak diambil, serta (5) Peluang intervensi yang terlewatkan (missed opportunities).



## BAB 2 — FAULT TREE ANALYSIS (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) adalah metode deduktif top-down yang digunakan untuk menganalisis penyebab suatu kejadian yang tidak diinginkan (undesired event). FTA menggunakan logika boolean dan simbol grafis khusus untuk menggambarkan bagaimana kombinasi kegagalan komponen dan kesalahan manusia dapat menghasilkan suatu insiden.

### 2.1 Simbol-Simbol Standar FTA

| Simbol        | Nama               | Fungsi  | Keterangan                              |
|---------------|--------------------|---|---|
| ○ (Elips)     | Top Event          | Kejadian puncak yang dianalisis               | Ditulis di bagian teratas pohon         |
| □ (Kotak)     | Intermediate Event | Kejadian antara dalam rantai kegagalan        | Perlu dikembangkan lebih lanjut         |
| ○ (Lingkaran) | Basic Event        | Kegagalan primer pada komponen                | Tidak perlu dikembangkan lebih lanjut   |
| ◇ (Berlian)   | Undeveloped Event  | Kejadian yang tidak dikembangkan lebih lanjut | Karena data tidak tersedia              |
| AND Gate (∧)  | Gerbang AND        | Semua input harus terjadi                     | Output terjadi jika SEMUA input terjadi |

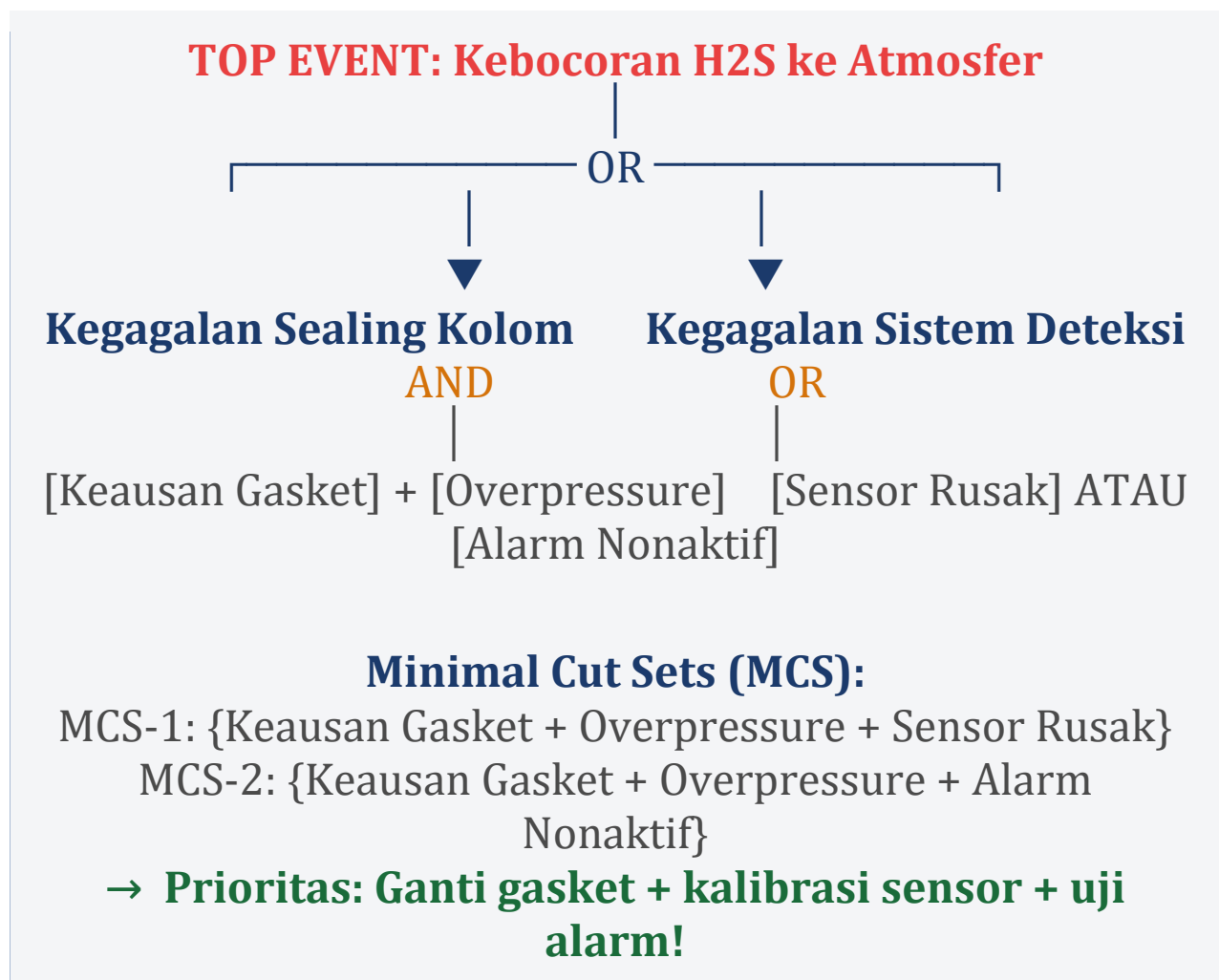
|              |                 |                              |   |
|--------------|-----------------|------------------------------|---|
| OR Gate (V)  | Gerbang OR      | Salah satu input sudah cukup | Output terjadi jika SALAH SATU input terjadi  |
| △ (Segitiga) | Transfer Symbol | Sambungan ke bagian lain FTA | Menghindari pengulangan cabang                |
| House Event  | House Event     | Kejadian yang pasti terjadi  | Merupakan kondisi yang diasumsikan selalu ada |

## 2.2 Konstruksi FTA — Langkah Demi Langkah

- Langkah 1 — Definisi Top Event: Rumuskan kejadian paling atas secara spesifik. Contoh: 'Kebocoran Gas Hidrogen Sulfida (H<sub>2</sub>S) di Unit Amine Absorber'
- Langkah 2 — Identifikasi Immediate Causes: Tanyakan 'Apa yang secara langsung menyebabkan Top Event?' Hasilkan 2-4 penyebab langsung yang dihubungkan dengan gerbang OR atau AND
- Langkah 3 — Dekomposisi Hierarki: Kembangkan setiap intermediate event ke penyebab yang lebih mendasar. Lanjutkan hingga mencapai basic events
- Langkah 4 — Identifikasi Minimal Cut Sets: Temukan kombinasi minimum kegagalan yang dapat menyebabkan Top Event. Ini menunjukkan jalur paling kritis
- Langkah 5 — Analisis Kuantitatif (opsional): Masukkan nilai probabilitas kegagalan untuk menghitung probabilitas Top Event

- Langkah 6 — Rekomendasi: Fokuskan pengendalian pada minimal cut sets dengan probabilitas tertinggi

## 2.3 Contoh FTA: Kebocoran H2S di Kolom Absorpsi



## BAB 3 — BOW-TIE ANALYSIS

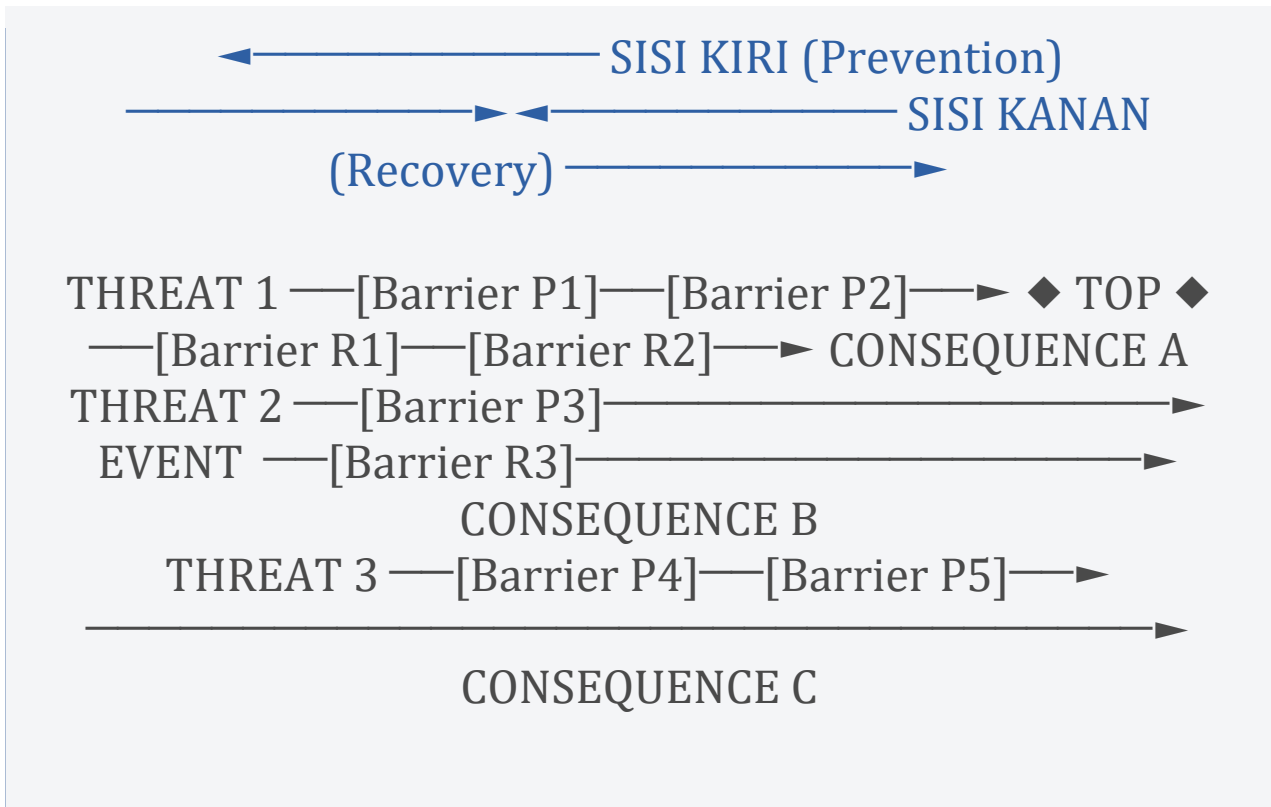
Bow-Tie Analysis adalah metode visual yang menggabungkan pendekatan FTA (sisi kiri) dan Event Tree Analysis/ETA (sisi kanan) dalam satu diagram berbentuk kupu-kupu atau dasi kupu-kupu (bow-tie). Metode ini sangat populer di industri Oil & Gas karena kemampuannya mengkomunikasikan risiko kepada semua tingkatan organisasi secara intuitif.

### 3.1 Komponen Utama Bow-Tie

| Komponen         | Posisi          | Definisi  | Contoh  |
|------------------|-----------------|---|---|
| Hazard           | Kiri jauh       | Sumber bahaya yang melekat pada sistem          | Gas LPG bertekanan tinggi                     |
| Threat (Ancaman) | Kiri tengah     | Penyebab yang dapat melepaskan hazard           | Korosi pipa, Human error, Kegagalan instrumen |
| Top Event        | Tengah (simpul) | Hilangnya kendali atas hazard (loss of control) | Kebocoran LPG tidak terkendali                |
| Consequence      | Kanan tengah    | Dampak yang terjadi setelah Top Event           | Kebakaran, Ledakan, Keracunan                 |

|                    |  |                                |   |
|--------------------|--|--------------------------------|---|
| Prevention Barrier | Kiri — antara Threat & Top Event       | Penghalang mencegah Top Event  | Pig launcher, Corrosion inhibitor, Safety valve |
| Recovery Barrier   | Kanan — antara Top Event & Consequence | Penghalang mengurangi dampak   | Gas detector, DELUGE system, Emergency shutdown |
| Escalation Factor  | Di atas/bawah barrier                  | Faktor yang melemahkan barrier | Power failure, Bypass, Kurang training          |

### 3.2 Struktur Diagram Bow-Tie



**⚡ = Escalation Factor (melemahkan barrier)**

### 3.3 Contoh Bow-Tie: Risiko Kebocoran Tanki Amonia

| Elemen                | Detail  |
|-----------------------|---|
| HAZARD                | Amonia cair bertekanan (NH <sub>3</sub> , TLV 25 ppm, IDLH 300 ppm) |
| TOP EVENT             | Kebocoran Amonia Tidak Terkendali dari Tanki Penyimpanan            |
| THREAT 1              | Korosi eksternal pada nozzle tanki                                  |
| THREAT 2              | Kegagalan safety valve (stuck closed)                               |
| THREAT 3              | Kesalahan operator saat transfer pompa                              |
| PREVENTION BARRIER T1 | Program inspeksi NDT tahunan   Coating proteksi katodik             |
| PREVENTION BARRIER T2 | Uji fungsi safety valve setiap 6 bulan   Redundansi PSV             |
| PREVENTION BARRIER T3 | Prosedur kerja tertulis (SOP)   Training operator tersertifikasi    |

|                     |   |
|---------------------|---|
| CONSEQUENCE 1       | Cloud Toxic: paparan pekerja di area tangki (zona terdampak 200m) |
| CONSEQUENCE 2       | Pencemaran lingkungan: amonia larut di air tanah                  |
| RECOVERY BARRIER C1 | Fixed NH3 gas detector (alarm 25 ppm)   Evakuasi zona 200m        |
| RECOVERY BARRIER C2 | Bund wall tangki   Neutralization pit dengan larutan asam         |
| ESCALATION FACTOR   | Power failure (gas detector mati)   Bypass alarm saat maintenance |

## BAB 4 — LAPORAN INVESTIGASI INSIDEN

Laporan investigasi insiden merupakan dokumen formal yang mendokumentasikan seluruh proses penyelidikan, temuan, dan rekomendasi perbaikan. Laporan yang baik harus objektif, faktual, komprehensif, dan berorientasi pada perbaikan sistem — bukan pada penyalahan individu.

### 4.1 Struktur Standar Laporan Investigasi

| No. | Bagian Laporan                      | Konten Utama   | Tujuan  |
|-----|-------------------------------------|--|---|
| 1   | Halaman Judul & Ringkasan Eksekutif | Tanggal, lokasi, tipe insiden, status korban, status investigasi | Memberikan gambaran cepat kepada manajemen senior |
| 2   | Deskripsi Insiden                   | Narasi faktual: apa, kapan, di mana, siapa yang terlibat         | Dokumentasi kejadian secara objektif              |
| 3   | Kronologi Kejadian (Timeline)       | Tabel waktu-kejadian, termasuk T-24 jam hingga pasca insiden     | Memvisualisasikan urutan kejadian kritis          |
| 4   | Analisis Penyebab                   | Direct cause, contributing cause, root cause — gunakan           | Menemukan akar masalah sistemik                   |

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
|   |  | metode<br>RCA/5-<br>Why/FTA  |  |
| 5 | Temuan<br>Investigasi                        | Fakta-fakta<br>kritis yang<br>ditemukan tim<br>investigasi                       | Basis pembuatan<br>rekomendasi         |
| 6 | Rekomendasi<br>Tindakan<br>Korektif          | Tindakan<br>jangka pendek,<br>menengah,<br>panjang —<br>dengan PIC &<br>deadline | Mencegah<br>pengulangan<br>insiden     |
| 7 | Pelajaran<br>Dipetik<br>(Lessons<br>Learned) | Key learning<br>yang perlu<br>disebarluaskan<br>ke seluruh unit                  | Transfer<br>pengetahuan<br>keselamatan |
| 8 | Lampiran                                     | Foto, data<br>proses,<br>diagram, hasil<br>uji<br>laboratorium,<br>wawancara     | Dukungan bukti<br>dan audit trail      |

## 4.2 Kualitas Laporan yang Baik vs. Buruk

**LAPORAN INVESTIGASI  
YANG BAIK**

**KESALAHAN UMUM YANG  
HARUS DIHINDARI**

|   |  |
|---|--|
| ✓ Menggunakan fakta terverifikasi, bukan asumsi   | ✗ Menyimpulkan sebelum bukti lengkap terkumpul     |
| ✓ Menyebutkan 'sistem gagal' bukan 'orang salah'  | ✗ Mengidentifikasi individu sebagai penyebab utama |
| ✓ Rekomendasi spesifik: siapa, apa, kapan         | ✗ Rekomendasi generik tanpa PIC dan deadline       |
| ✓ Didistribusikan ke semua fasilitas serupa       | ✗ Hanya disimpan di arsip tanpa diseminasi         |
| ✓ Ditindaklanjuti dan diverifikasi efektivitasnya | ✗ Tindakan korektif tidak diverifikasi             |
| ✓ Menggunakan foto, data log, dan diagram         | ✗ Tidak ada evidence yang terdokumentasi           |

### 4.3 Template Rekomendasi Tindakan Korektif

| N o. | Temuan              | Akar Masalah                | Tindakan Korektif                       | PIC               | Deadline | Status |
|------|---------------------|-----------------------------|---|-------------------|----------|--------|
| 1    | Katup PSV tersumbat | Tidak ada program kalibrasi | Implementasi PM Plan PSV setiap 6 bulan | Dept. Maintenance | 30 hari  | Open   |
| 2    | Operator tidak      | Tidak ada briefin           | Toolbox talk wajib                      | HSE Manager       | 7 hari   | Closed |

|   | aware prosedur baru              | g perubahan SOP                  | setiap perubahan SOP                     |                  |         |             |
|---|----------------------------------|----------------------------------|--|------------------|---------|-------------|
| 3 | Gas detector tidak terkali brasi | Jadwal kalibrasi tidak dimonitor | Implementasi sistem CMMS untuk kalibrasi | Dept. Instrument | 60 hari | In Progress |



### 5.1 Texas City Refinery Explosion (2005)

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Tanggal &amp; Lokasi</b> | 23 Maret 2005   Texas City, Texas, USA — Kilang BP Texas City |
| <b>Korban</b>               | 15 orang meninggal, 180 orang luka-luka                       |
| <b>Kerugian</b>             | Lebih dari USD 1,5 miliar (kerusakan + kompensasi + denda)    |
| <b>Fasilitas</b>            | Unit isomerasi (ISOM) untuk produksi high-octane gasoline     |
| <b>Proses</b>               | Pemrosesan hidrokarbon ringan pada suhu dan tekanan tinggi    |

#### Kronologi Kejadian:

- Pagi hari: Unit ISOM distart-up setelah shutdown maintenance. Raffinate splitter tower diisi ulang
- Supervisor tidak di lokasi saat startup kritis berlangsung — level di tower tidak terpantau
- Level cairan di tower melonjak jauh melebihi batas — level indicator diketahui sudah rusak sejak lama
- Cairan hidrokarbon meluap melalui relief valve ke blowdown drum yang sudah kelebihan kapasitas
- Cairan tumpah ke parit terbuka dan menguap membentuk awan uap hidrokarbon yang mudah terbakar
- Mesin pick-up yang sedang berjalan di sekitar lokasi menyalakan campuran uap-udara tersebut
- Ledakan dahsyat menghancurkan trailer temporary yang ditempati pekerja kontraktor

## Root Cause Analysis — Texas City:

| Kategori               | Akar Masalah yang Ditemukan  |
|------------------------|--|
| Peralatan (Equipment)  | Level indicator raffinate splitter rusak — tidak diganti; Blowdown drum ukurannya tidak memadai; Tidak ada flare system yang terintegrasi                                    |
| Prosedur (Procedure)   | SOP startup tidak cukup rinci; Tidak ada pembatasan jumlah orang di area startup; Trailer pekerja ditempatkan terlalu dekat unit proses                                      |
| Manusia (Human)        | Kelelahan operator (bekerja 12 jam+); Supervisor tidak hadir saat startup kritis; Komunikasi shift handover yang buruk   |
| Manajemen (Management) | Budaya safety yang inferior — produksi lebih diprioritaskan dari keselamatan; Anggaran maintenance dipotong berturut-turut; Tidak ada program audit keselamatan yang efektif |
| Budaya Organisasi      | Baker Panel menemukan: BP mengandalkan lagging   |

indicator (injury rate)  
bukan leading indicator;  
'Normalization of deviance'  
— penyimpangan dianggap  
normal

### **Lessons Learned — Texas City:**

- ▶ Process Safety ≠ Personal Safety: Angka TRIR rendah bukan berarti proses aman — diperlukan Process Safety KPI terpisah
- ▶ Leading Indicators: Pantau near-misses, SOP deviations, equipment overdue inspection — jangan tunggu kecelakaan terjadi
- ▶ Temporary Facility Placement: Trailer dan kantor sementara harus ditempatkan di luar zona bahaya (>60m dari unit proses aktif)
- ▶ Mechanical Integrity: Program pemeliharaan instrumen kritis tidak boleh dikompromikan karena anggaran
- ▶ Management of Change (MOC): Setiap perubahan — termasuk penempatan fasilitas sementara — harus melalui proses MOC
- ▶ Layer of Protection Analysis (LOPA): Identifikasi kekurangan lapisan perlindungan sebelum insiden terjadi

## **5.2 Bhopal Disaster (1984)**

**Tanggal &  
Lokasi**

2–3 Desember 1984 | Bhopal, Madhya Pradesh, India

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>Fasilitas</b>        | Pabrik pestisida Union Carbide India Limited (UCIL)                   |
| <b>Agen Berbahaya</b>   | Methyl Isocyanate (MIC) — gas sangat beracun, reaktif terhadap air    |
| <b>Korban Meninggal</b> | 3.000–8.000 meninggal dalam 72 jam pertama; 15.000–20.000 total       |
| <b>Korban Luka</b>      | Lebih dari 500.000 orang terdampak (gangguan pernafasan, mata, saraf) |
| <b>Warisan</b>          | Bencana industri kimia terburuk dalam sejarah manusia                 |

### Kronologi Malam Nahas:

- Sore hari: Flushing air ke pipa — air masuk ke tangki MIC T-610 yang berisi 42 ton MIC melalui sumbatan yang tidak terduga
- Pukul 21.00: Operator mencium bau menyengat dan sensasi iritasi mata — diabaikan
- Pukul 23.00: Tekanan di tangki T-610 mulai naik — operator mengira ini normal karena nitrogen pressure
- Tengah malam: Tekanan melonjak drastis — reaksi eksotermis antara MIC dan air berlangsung tak terkendali
- Pukul 00.30: Tangki pecah — 40 ton MIC cair dan gas menyembur ke udara malam yang dingin dan tenang
- Dini hari: Awan gas beracun menyebar diam-diam ke permukiman padat, ribuan orang meninggal dalam tidur

### Root Cause Analysis — Bhopal:

| Kategori | Temuan Kritis |
|----------|---------------|
|----------|---------------|

|                    |  |
|--------------------|--|
| Desain Proses      | Tangki MIC berukuran terlalu besar (42 ton); Tidak ada flare tower yang berfungsi; Scrubber kaustik tidak beroperasi malam itu   |
| Sistem Keselamatan | Refrigeration system tangki MIC dimatikan sejak bulan Juni (hemat biaya); Alarm tinggi tekanan tidak berfungsi; Sistem netralisasi tidak memadai kapasitasnya                        |
| Manajemen          | Pabrik beroperasi jauh di bawah kapasitas — banyak safety staff dikurangi; Pemeliharaan rutin ditunda karena tekanan biaya; Manual prosedur sudah usang                              |
| Regulasi           | Tidak ada standar keselamatan proses yang memadai di India saat itu; Pabrik diizinkan beroperasi di area permukiman padat; Tidak ada emergency response plan untuk komunitas sekitar |
| Informasi Publik   | Masyarakat tidak tahu bahaya MIC; Tidak ada sistem peringatan dini publik; Rumah sakit tidak   |

memiliki antidot (tidak ada panduan penanganan MIC)

### **Lessons Learned — Bhopal:**

- ▶ **Minimize Inventory:** Prinsip 'intensification' — kurangi inventori bahan berbahaya ke minimum. 42 ton MIC adalah jauh di atas kebutuhan produksi harian
- ▶ **Defence in Depth:** Bhopal menunjukkan kegagalan berlapis (semua safety layer gagal bersamaan). Setiap layer harus independen dan teruji
- ▶ **Community Right to Know:** Masyarakat di sekitar pabrik berhak tahu bahaya yang ada — dasar lahirnya SARA Title III di AS dan regulasi REACH di Eropa
- ▶ **Process Hazard Analysis (PHA):** HAZOP atau PHA wajib dilakukan untuk semua perubahan operasi — termasuk mematikan refrigerasi MIC
- ▶ **Emergency Planning:** Komunitas dan rumah sakit sekitar pabrik harus memiliki rencana darurat yang terintegrasi dengan rencana fasilitas
- ▶ **Inherently Safer Design (ISD):** Pertimbangkan substitusi bahan berbahaya atau minimisasi penggunaan sejak fase desain



Berikut adalah dua studi kasus yang dirancang untuk melatih kemampuan mahasiswa dalam menerapkan metode investigasi yang telah dipelajari. Setiap kasus dilengkapi dengan analisis menggunakan minimal dua metode investigasi.

### **STUDI KASUS 1 — Kegagalan Reaktor Batch di Pabrik Farmasi**

---

#### **SKENARIO:**

Sebuah pabrik farmasi di Jawa Barat mengoperasikan reaktor batch untuk sintesis senyawa aktif obat. Pada tanggal 15 Agustus 2024 pukul 14.23, terjadi runaway reaction yang menyebabkan tekanan di dalam reaktor melonjak melampaui batas design pressure (15 barg). Rupture disk pada reaktor pecah, dan campuran reaksi bersuhu 180°C tumpah ke lantai ruang proses. Dua orang operator mengalami luka bakar serius (derajat II-III). Kerugian material diperkirakan Rp 4,5 miliar.

#### **FAKTA-FAKTA KUNCI:**

- Batch sebelumnya berjalan normal. Ini batch ke-3 dalam shift yang sama
- Operator baru (pengalaman 3 bulan) mengoperasikan sendiri — operator senior sedang istirahat makan siang
- Sensor temperatur TI-201 ditemukan dalam kondisi failed high (membaca lebih rendah dari aktual)

- Log maintenance menunjukkan TI-201 sudah dilaporkan 'drift' sejak 2 minggu lalu tetapi belum diperbaiki
- SOP mensyaratkan monitoring temperatur setiap 15 menit, tetapi log sheet hanya terisi setiap 45 menit
- Cooling water flow recorder menunjukkan aliran pendingin turun 40% pada 30 menit sebelum insiden (valve cooling fouled)
- Supervisor line tidak ada di ruang proses saat startup batch ke-3

## PENYELESAIAN STUDI KASUS 1

### A. Metode 5-Why Analysis:

| Iterasi Why | Pertanyaan                           | Jawaban   |
|-------------|--------------------------------------|---|
| Why 1       | Mengapa terjadi runaway reaction?    | Temperatur reaktor melampaui titik kritis reaksi eksotermis tanpa terdeteksi        |
| Why 2       | Mengapa temperatur tidak terdeteksi? | Sensor TI-201 mengalami drift — membaca lebih rendah dari aktual (failed high mode) |
| Why 3       | Mengapa sensor tidak diperbaiki?     | Work order maintenance sudah dibuat 2 minggu lalu tetapi tidak dijadwalkan          |

| Iterasi Why | Pertanyaan   | Jawaban   |
|-------------|--|---|
|             |  | sebagai prioritas tinggi  |
| Why 4       | Mengapa tidak diprioritaskan?                          | Sistem klasifikasi prioritas maintenance tidak mengidentifikasi TI-201 sebagai Safety Critical Instrument                             |
| Why 5       | Mengapa tidak teridentifikasi sebagai safety critical? | Tidak ada prosedur Safety Critical Equipment (SCE) register — tidak ada sistem untuk mengklasifikasikan dan memantau instrumen kritis |
| ROOT CAUSE  | Akar Masalah   | Tidak adanya Safety Critical Equipment register dan sistem pemeliharaan prioritas berbasis risiko                                     |

## B. Timeline Analysis:

| Waktu      | Kejadian   | Peluang Intervensi yang Terlewat                                |
|------------|--|---|
| T-14 hari  | TI-201 dilaporkan drift oleh operator, WO dibuat                       | → Harusnya: Gunakan thermometer backup + percepat perbaikan     |
| T-1 jam    | Supervisor meninggalkan area tanpa handover formal                     | → Harusnya: Briefing operator tentang kondisi sensor bermasalah |
| T-45 menit | Cooling water flow turun 40% — tidak ada yang memperhatikan            | → Harusnya: Alarm pada FI cooling water untuk trigger respons   |
| T-30 menit | Operator melakukan pembacaan suhu (terbaca normal karena sensor drift) | → Harusnya: Cross-check dengan indikator temperatur backup      |
| T-15 menit | Tekanan mulai naik perlahan (abnormal)                                 | → Harusnya: Alarm tekanan harus memicu investigasi segera       |

|     |  |   |
|-----|--|---|
| T=0 | Rupture disk pecah — runaway reaction tidak terkendali | Insiden tidak terhindarkan pada titik ini |
|-----|--|---|

### C. Rekomendasi Tindakan Korektif:

| Prioritas                 | Tindakan  | PIC                    | Target  |
|---------------------------|---|------------------------|---------|
| SEGERA (0-7 hari)         | Audit semua instrumen di jalur proses kritis — identifikasi yang bermasalah | Dept. Instrument + HSE | 7 hari  |
| SEGERA (0-7 hari)         | Terapkan aturan 2-operator untuk semua batch reaktor (no solo operation)    | Plant Manager          | Segera  |
| JANGKA MENENGAH (30 hari) | Buat dan implementasikan Safety Critical Equipment (SCE) Register           | Reliability Eng + HSE  | 30 hari |
| JANGKA MENENGAH (30 hari) | Pasang alarm independen pada cooling water flow (FIC dengan interlock)      | Dept. Instrument       | 30 hari |

| Prioritas                | Tindakan   | PIC                 | Target  |
|--------------------------|--|---------------------|---------|
| JANGKA PANJANG (90 hari) | Implementasikan sistem CMMS dengan klasifikasi risiko untuk semua WO | Maintenance Mgr     | 90 hari |
| JANGKA PANJANG (90 hari) | Revisi SOP: wajibkan supervisor sign-off sebelum batch dimulai       | Plant Manager + HSE | 45 hari |

## STUDI KASUS 2 — Kebocoran Gas H<sub>2</sub>S di Platform Offshore

### SKENARIO:

Sebuah platform produksi minyak dan gas di Selat Makassar mengalami kebocoran H<sub>2</sub>S dari flange joint pada pipa gas bertekanan 45 barg. Insiden terjadi pada 22 November 2024 pukul 03.45 WITA saat shift malam. Tiga orang pekerja terpapar H<sub>2</sub>S konsentrasi tinggi (>100 ppm). Dua orang pingsan dan satu orang mengalami sesak napas berat. Evakuasi darurat dilakukan dan platform sempat shutdown selama 72 jam. Kerugian produksi mencapai USD 2,1 juta.

### FAKTA-FAKTA KUNCI:

- Flange joint adalah jenis raised-face ANSI 600# yang terpasang sejak 8 tahun lalu tanpa penggantian gasket
- Inspeksi terakhir pada joint tersebut dilakukan 3,5 tahun lalu — batas inspeksi adalah 3 tahun
- Personal H2S monitor 2 dari 3 korban ternyata tidak berbunyi saat memasuki area — baterai lemah
- Wind direction indicator menunjukkan angin bertiup dari platform ke arah korban — mereka tidak menyadari bahaya di balik angin
- Platform beroperasi dengan kandungan H2S yang meningkat 35% dalam 6 bulan terakhir (diketahui dari data reservoir)
- Fixed H2S detector di area tersebut tidak memiliki audio alarm — hanya visual indicator (lampu merah)
- Prosedur 'buddy system' untuk pekerjaan malam diabaikan — ketiga korban bekerja sendiri-sendiri di area berbeda
- Emergency Response Team membutuhkan 18 menit untuk mencapai lokasi (target respons: 5 menit)

## PENYELESAIAN STUDI KASUS 2

### A. Fault Tree Analysis (FTA) — Paparan H2S pada Pekerja:

**TOP EVENT: Paparan H2S pada Pekerja hingga Ganggu**

**AND GATE — Semua kondisi berikut harus te**



| KEBOCORAN | DETEKSI | PERLINDUNG | RE  
 | H2S TERJADI | GAGAL | DIRI GAGAL | LAM

KEBOCORAN (OR): Gasket failure (8 tahun tanpa ganti) | Inspeksi ov  
 Peningkatan kandungan H2S reservoir

DETEKSI GAGAL (OR): Fixed detector hanya visual (no audio) | Perso  
 | Tidak ada buddy system

PERLINDUNGAN GAGAL (AND): Tiga pekerja bekerja sendiri + di are  
 monitor tidak berfungsi

RESPONS LAMBAT (OR): ERT 18 menit (target 5 menit) | Jalur evaku  
 rendezvous jauh

**MINIMAL CUT SET KRITIS: {Gasket Failure + Personal Monitor B**

## B. Bow-Tie Analysis — Kebocoran H2S di Platform:

| Komponen Bow-Tie | Detail  |
|------------------|---|
| HAZARD           | Gas H2S dalam aliran produksi (konsentrasi hingga 15.000 ppm)       |
| TOP EVENT        | Kebocoran H2S Tidak Terkendali dari Flange Joint Pipa Gas           |
| THREAT 1         | Degradasi gasket akibat korosi dan fatigue setelah 8 tahun          |
| THREAT 2         | Peningkatan kandungan H2S dari reservoir — overstress pada material |

| Komponen Bow-Tie      | Detail  |
|-----------------------|---|
| THREAT 3              | Kelebihan torsi saat terakhir maintenance flange (manusia error)                                |
| PREVENTION BARRIER T1 | Program inspeksi flange 3-tahunan (OVERDUE 6 bln)   Condition-based monitoring via UT thickness |
| PREVENTION BARRIER T2 | H2S service material specification review   Monitoring kandungan H2S reservoir berkala          |
| CONSEQUENCE 1         | Inhalasi H2S oleh pekerja → Gangguan saraf, tidak sadar, kematian                               |
| CONSEQUENCE 2         | Awan gas beracun menyebar ke seluruh platform → evakuasi massal                                 |
| CONSEQUENCE 3         | Potensi ignition → kebakaran/ledakan platform   |
| RECOVERY BARRIER C1   | Fixed H2S detector + audio alarm   Personal H2S monitor tersertifikasi                          |
| RECOVERY BARRIER C2   | Buddy system wajib   Wind monitoring + safety zone rules  |
| RECOVERY BARRIER C3   | Emergency Response Team (target <5 menit)   Muster station yang terdekat                        |

| Komponen Bow-Tie  | Detail   |
|-------------------|--|
| ESCALATION FACTOR | Baterai personal monitor tidak diuji harian   Fixed alarm hanya visual   ERT <5 min tidak tercapai |

### C. Rekomendasi Komprehensif:

| Kategori             | Tindakan Korektif   | Prioritas |
|----------------------|---|-----------|
| Integritas Mekanikal | Inspeksi darurat semua flange joint H2S service yang overdue — ganti gasket berdasarkan temuan                    | SEGERA    |
| Sistem Deteksi       | Upgrade semua fixed H2S detector dengan audio alarm + strobe light. Pasang additional detector di area blind spot | 7 hari    |
| Proteksi Pekerja     | Wajibkan cek baterai/bump test personal H2S monitor di setiap awal shift — ada                                    | SEGERA    |

|                    |   |         |
|--------------------|---|---------|
|                    | sign-off supervisor   |         |
| Prosedur Kerja     | Implementasikan STRICT buddy system untuk seluruh aktivitas di area H2S — tidak ada pengecualian                                | SEGERA  |
| Emergency Response | Drill ERT setiap bulan dengan target <5 menit. Relokasi ERT post lebih dekat ke zona proses                                     | 30 hari |
| Manajemen Risiko   | Update risk register dengan kandungan H2S baru dari reservoir — trigger HAZOP ulang   | 30 hari |
| Sistem Manajemen   | Implementasikan overdue tracking untuk safety-critical inspection — eskalasi otomatis ke manajemen senior jika >1 bulan overdue | 60 hari |



## RINGKASAN DAN POIN KUNCI PERTEMUAN 4

| Topik               | Poin Kunci  |
|---------------------|---|
| Metode Investigasi  | RCA mencari akar masalah sistemik; 5-Why efektif untuk rantai sebab tunggal; Timeline Analysis mengidentifikasi missed opportunities; Kombinasi ketiganya memberikan investigasi paling komprehensif                              |
| Fault Tree Analysis | FTA adalah pendekatan deduktif top-down; Gunakan simbol standar (AND/OR gate, basic event, top event); Minimal Cut Sets menunjukkan kombinasi kegagalan paling kritis yang harus diprioritaskan untuk pengendalian                |
| Bow-Tie Analysis    | Bow-tie menggabungkan FTA (prevention) dan ETA (recovery); Identifikasi semua threat, barrier, dan consequence; Perhatikan escalation factor yang dapat melemahkan barrier; Sangat efektif untuk komunikasi risiko ke semua level |
| Laporan Investigasi | Laporan harus faktual, sistematis, dan berorientasi perbaikan sistem; Rekomendasi harus spesifik dengan PIC, deadline, dan verifikasi; Lessons learned harus disebarluaskan ke seluruh fasilitas serupa                           |
| Texas City 2005     | Process safety $\neq$ personal safety (TRIR rendah $\neq$ proses aman); Normalization of deviance sangat berbahaya; Mechanical  |

|               |  |
|---------------|--|
|               | integrity dan leading indicators adalah kunci  |
| Bhopal 1984   | Minimize hazardous inventory (inherently safer design); Defence in depth dengan setiap layer yang independen; Community right to know dan emergency planning adalah kewajiban moral dan legal          |
| Studi Kasus 1 | Safety Critical Equipment register mencegah kegagalan sensor kritis terlewat; No solo operation pada proses berbahaya; Sistem CMMS berbasis risiko adalah fondasi reliability                          |
| Studi Kasus 2 | Personal safety equipment (detector) tidak berguna tanpa maintenance rutin; Buddy system bukan opsional di area H2S; Inspection overdue pada safety-critical item adalah tanda bahaya sistem manajemen |

## Referensi Utama

---

- CCPS (Center for Chemical Process Safety) — 'Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents', 3rd Edition, AIChE, 2019

- U.S. Chemical Safety Board (CSB) — 'Investigation Report: BP Texas City Refinery Explosion', Report No. 2005-04-I-TX, 2007
- Lees, F.P. — 'Loss Prevention in the Process Industries', 4th Edition, Butterworth-Heinemann, 2012
- IEC 61025 — 'Fault Tree Analysis (FTA)', International Electrotechnical Commission, 2006
- Hollnagel, E. — 'Barriers and Accident Prevention', Ashgate Publishing, 2004
- API RP 754 — 'Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries', 2nd Edition, 2016
- Kletz, T. & Amyotte, P. — 'Process Plants: A Handbook for Inherently Safer Design', 2nd Edition, CRC Press, 2010

*"The goal of process safety is not zero accidents — it is zero catastrophic accidents.  
And that requires understanding why accidents happen before they happen."*

*Tujuan keselamatan proses bukanlah nol kecelakaan — melainkan nol kecelakaan katastroofik.  
Dan hal itu menuntut pemahaman tentang mengapa kecelakaan terjadi, sebelum kecelakaan itu benar-benar terjadi*

— Trevor Kletz, Process Safety Pioneer