

ANALISIS POTENSI KEBAKARAN PADA HEAT EXCHANGER MENGUNAKAN METODE 5 *WHY'S* DAN *DOW'S FIRE & EXPLOSION INDEX* DI KILANG

Budi Sulistiyo Nugroho^{1*}, Farid Alfalaki Hamid¹, Aldino Akbar Mulianas¹

¹Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, PEM Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38, Cepu, 58315

*E-mail: nbudi.nugroho@gmail.com

ABSTRAK

Industri pengolahan minyak dan gas (migas), dengan kompleksitas teknologi dan kondisi operasi ekstrem, memiliki risiko insiden yang tinggi, terutama pada peralatan krusial seperti *Heat Exchanger* (HE) yang beroperasi pada tekanan dan temperatur tinggi. Kecelakaan di unit ini dapat menyebabkan kerugian material dan korban jiwa, sehingga manajemen risiko dan keselamatan proses menjadi sangat penting. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi kebakaran pada *Heat Exchanger* di kilang, guna mengidentifikasi akar penyebab serta mengkuantifikasi risiko yang terkait. Studi ini menggunakan pendekatan ganda: *Dow's Fire & Explosion Index (F&EI)* untuk penilaian bahaya kuantitatif dan estimasi kerugian material, serta metode 5 *Why's* untuk identifikasi akar penyebab insiden secara kualitatif. Hasil perhitungan *F&EI* menunjukkan nilai 121,44, yang mengategorikan *Heat Exchanger* sebagai unit dengan "bahaya menengah" (*Intermediate hazard*), dengan estimasi kerugian material mencapai \$46.204,54. Melalui analisis 5 *Why's*, teridentifikasi lima skenario utama penyebab kebakaran: kebocoran hidrokarbon panas, *overheating*, pecahnya pipa *outlet Heat Exchanger*, masalah sumber *ignition*, dan *flame-out* pada *furnace*. Integrasi kedua metode ini terbukti efektif dalam memberikan pemahaman komprehensif terhadap bahaya kebakaran, dari tingkat risiko terukur hingga akar permasalahan sistemik. Pendekatan ini memungkinkan perumusan strategi mitigasi yang lebih tepat dan terfokus untuk meningkatkan keselamatan operasional *Heat Exchanger*.

Kata kunci: Kebakaran, HE, Dow's F&EI, 5 *why's*

1. PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas (migas) merupakan salah satu sektor dengan tingkat risiko tertinggi akibat kompleksitas teknologi, kondisi operasi ekstrem, serta keterlibatan multipihak dalam rantai produksinya. Kondisi tersebut meningkatkan kerentanan terhadap kejadian berbahaya seperti kebakaran, ledakan, serta kegagalan peralatan proses [1,2]. Dalam konteks ini, manajemen keselamatan proses (*Process Safety Management/PSM*) menjadi elemen strategis untuk mencegah kecelakaan besar dan meminimalkan potensi kerugian material maupun korban jiwa.

Salah satu peralatan kritis yang memiliki kontribusi signifikan terhadap keandalan operasi sekaligus berisiko tinggi adalah *Heat Exchanger (HE)*, termasuk *Amine Reboiler* yang beroperasi pada tekanan dan temperatur tinggi serta menangani fluida mudah terbakar. Kegagalan pada unit ini berpotensi menyebabkan penghentian operasi, pelepasan bahan berbahaya, hingga kebakaran dan ledakan [3]. Sejumlah insiden besar, seperti ledakan *West Fertilizer Company* [4] serta rangkaian kebakaran di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang pada 2011–2015 [4,5], menegaskan pentingnya pengendalian risiko yang tepat pada fasilitas proses.

Secara umum, risiko dipahami sebagai peluang terjadinya kegagalan yang menimbulkan konsekuensi merugikan bagi manusia, fasilitas, maupun lingkungan [6], sedangkan potensi bahaya dapat muncul hampir di seluruh aktivitas kerja [7]. Industri migas umumnya menerapkan

kan metode identifikasi risiko konvensional seperti *Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA)*, namun pendekatan tersebut bersifat umum dan belum memberikan estimasi kuantitatif terhadap tingkat keparahan maupun potensi kerugian pada unit proses yang kompleks. Untuk melengkapi keterbatasan tersebut, analisis akar penyebab menggunakan metode *5 Why's* digunakan untuk menelusuri penyebab mendasar suatu kegagalan melalui teknik interogatif berulang [8,9], sedangkan *Dow's Fire and Explosion Index (F&EI)* memberikan pendekatan kuantitatif semiempiris untuk menilai potensi bahaya kebakaran dan ledakan berdasarkan karakteristik proses, sifat bahan, dan kondisi operasi [10].

Metode *F&EI* memiliki keunggulan dalam memberikan indeks numerik yang merepresentasikan tingkat bahaya serta estimasi kerugian material, sehingga mendukung pengambilan keputusan terkait prioritas mitigasi, proteksi kebakaran, dan penentuan jarak aman. Sementara itu, metode *5 Why's* terbukti efektif dalam mengidentifikasi kelemahan sistemik, termasuk ketidaksesuaian prosedur, kurangnya kompetensi operator, serta kegagalan inspeksi dan perawatan [11,12]. Integrasi kedua metode tersebut menghasilkan pendekatan yang komprehensif, yaitu penilaian tingkat risiko secara kuantitatif melalui *F&EI* dan penelusuran akar penyebab secara kualitatif melalui analisis *5 Why's*.

Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini dilakukan dengan judul “Analisis Potensi Kebakaran pada Heat Exchanger Menggunakan Metode 5 Why's dan DOW'S F&EI di Kilang.” Tujuan penelitian adalah menganalisis potensi bahaya kebakaran dan ledakan pada unit *Heat Exchanger* secara kuantitatif dan kualitatif serta merumuskan strategi mitigasi berbasis akar penyebab untuk meningkatkan keselamatan proses di lingkungan kilang.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan kualitatif melalui integrasi metode *Dow's Fire and Explosion Index (F&EI)* dan analisis akar penyebab *5 Why's*. Metode penelitian mencakup sumber data, alur metodologi, serta batasan penelitian sebagai berikut:

a. Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian terdiri atas data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari unit Heat Exchanger di kilang berupa data operasi aktual—meliputi suhu, tekanan, laju alir, serta karakteristik fluida—yang diambil dari sistem Distributed Control System (DCS). Data teknis pendukung lainnya mencakup dokumen HAZOP (HAZOP Sheet), Process Flow Diagram (PFD), Piping and Instrumentation Diagram (P&ID), serta histori inspeksi, pemeliharaan, dan catatan deviasi operasi. Data sekunder diperoleh dari standar industri, pedoman keselamatan proses, serta literatur ilmiah terkait penerapan metode *Dow's F&EI* dan analisis *5 Why's*. Keseluruhan data digunakan untuk memastikan ketepatan perhitungan indeks bahaya dan penelusuran akar penyebab.

b. Alur dan Tahapan Metodologi

Penelitian ini tidak menyertakan diagram alir metodologi dalam bentuk grafis, namun prosedur penelitian dijalankan melalui tahapan sistematis sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data Teknis dan Operasi:

Mengumpulkan data operasi dari DCS serta dokumen teknis seperti HAZOP Sheet, PFD, dan P&ID.

2. Identifikasi Bahaya Awal:

Mengidentifikasi potensi bahaya pada Heat Exchanger berdasarkan parameter operasi, sifat bahan, desain peralatan, dan histori insiden.

3. Perhitungan *Dow's Fire and Explosion Index (F&EI)*:

Meliputi penentuan Material Factor (MF), penilaian faktor penalti proses, perhitungan F&EI, penentuan radius kerusakan, serta estimasi kerugian material.

4. Analisis Akar Penyebab dengan Metode 5 Why's:

Melakukan penelusuran akar penyebab yang berkontribusi terhadap potensi kebakaran atau kegagalan peralatan melalui pengajuan pertanyaan “mengapa” secara berulang.

5. Integrasi Hasil Analisis:

Menggabungkan hasil F&EI dan 5 Why's untuk mendapatkan gambaran komprehensif mengenai tingkat risiko dan akar permasalahan operasional.

6. Perumusan Strategi Mitigasi:

Menyusun rekomendasi teknis dan prosedural untuk mengurangi risiko melalui pengendalian engineering, perbaikan prosedur kerja, peningkatan inspeksi, serta penguatan sistem proteksi kebakaran.

c. Batasan Penelitian (*Scope and Limitation*)

Penelitian ini memiliki batasan sebagai berikut:

1. Analisis hanya difokuskan pada satu unit *Heat Exchanger* di kilang dan tidak mencakup unit proses lain.
2. Perhitungan F&EI menggunakan data operasi normal dan tidak mempertimbangkan kondisi ekstrem di luar parameter desain.
3. Analisis 5 *Why's* dilakukan berdasarkan data historis, wawancara terbatas, serta dokumen teknis yang tersedia, tanpa melakukan investigasi lapangan terhadap insiden aktual.
4. Validitas analisis bergantung pada kelengkapan dan akurasi dokumen teknis seperti PFD, P&ID, HAZOP Sheet, dan data DCS yang diberikan oleh pihak operasional.
5. Penelitian tidak mencakup pemodelan konsekuensi lanjutan dengan perangkat lunak khusus (seperti PHAST atau ALOHA), sehingga fokus analisis tetap pada metode semiempiris F&EI dan pendekatan kualitatif 5 *Why's*.

d. Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini adalah variabel dependen dan variabel independen didefinisikan dari kerangka berpikir heat exchanger unit. Variabel dependen adalah kondisi yang peneliti ukur bahwa sejauh mana variabel independen berpengaruh. Berdasarkan hal itu penulis mengambil variabel dependen yaitu kondisi operasi seperti suhu, tekanan, level dan aliran. Bukan hanya itu desain dan kondisi peralatan juga termasuk yang mana akan dipengaruhi oleh variabel independen yaitu *potential analysis fire & explosion*.

Pada perancangan penelitian menggunakan metode 5 *why's* dan *Dow's F&EI* ini menggunakan *Material Factor (MF)* dan F3 untuk menghitung *fire and explosion index* serta mengajukan pertanyaan “mengapa?” untuk mengetahui akar masalah penyebab ledakan pada unit *heat exchanger*. Perhitungan serta analisis akar masalah memerlukan data dan informasi terkait peralatan yang dianalisis dari data pendukung.

Langkah menggunakan metode *Dow's F&EI* adalah sebagai berikut:

- a. Menentukan unit yang ingin diteliti (*heat exchanger*);
- b. Menentukan kecelakaan yang ingin dianalisis dan dalam penelitian ini kecelakaan yang di analisis adalah ledakan;
- c. Mengumpulkan data terkait unit proses seperti PFD, P&ID, kondisi operasi termasuk *Process Flow Diagram (PFD)*, *Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)*, lembar data HAZOP (*Hazard and Operability Study*), data operasi historis dari *Distributed Control System (DCS)* seperti suhu dan tekanan, serta data laboratorium relevan;

- d. Menghitung *Material Factor* (MF) Menggunakan *Material factor Determination Guide* [8] dengan rumus:

$$MF = NF + NR \dots\dots\dots (1)$$

Tabel 1 Material Factor Determination Guide

<i>Liquid & Gases Flammability or Combustibility¹</i>	NFPA 325M Or 49	<i>Reactivity or Instability</i>				
		$N_R=0$	$N_R=1$	$N_R=2$	$N_R=3$	$N_R=4$
Non-combustible ²	$N_F=0$	1	14	24	29	40
F.P. > 200 °F (>93 °C)	$N_F=1$	4	14	24	29	40
F.P. > 100 °F (>38.8 °C) ≤ 200 °F (≤ 93.3 °C)	$N_F=2$	10	14	24	29	40
F.P. > 73 °F (>22.8 °C) ≤ 100 °F (≤ 37.8 °C) or F.P. < 73 °F (>22.8 °C) & ≥ 200 °F (≥ 37.8 °C)	$N_F=3$	16	16	24	29	40
F.P. < 73 °F (<22.8 °C) & B.P. < 100 °F (< 37.8 °C)	$N_F=4$	21	21	24	29	40
<i>Combustible Dust or Mist³</i>						
St-1 ($K_{St} \leq 200$ bar m/sec)		16	16	24	29	40
St-2 ($K_{St} = 201-300$ bar m/sec)		21	21	24	29	40
St-3 ($K_{St} > 300$ bar m/sec)		24	24	24	29	40
<i>Combustible Solids</i>						
Dense > 40 mm thick ⁴	$N_F=1$	4	14	24	29	40
Open < 40 mm thick ⁵	$N_F=2$	10	14	24	29	40
Foam, fiber, powder, etc. ⁶	$N_F=3$	16	16	24	29	40

Sumber: [13]

- e. Menghitung *general process hazard factor* (F1);

Tabel 2 Penentuan General Process Hazard

Faktor	Analisis	Nilai
<i>Exothermic Reaction</i>	Tidak ada, hanya perpindahan panas	1,00
<i>Endothermic Process</i>	Ada proses pemanasan pada <i>Heat Exchanger</i>	0,20
<i>Enclosed Unit</i>	Sistem berada dalam unit tertutup	0,45
<i>Acces</i>	Akses atau jalan normal sesuai standar <i>Refinery</i>	0,25
<i>Drainage/Spill Control</i>	Sistem drainase minim	0,50
Total F1		2,40

- f. Menghitung *special process hazard factor* (F2);

Tabel 3 Penentuan Special Process Hazard

Faktor	Analisis	Nilai
<i>Toxic Material</i>	Tidak (Long residue bukan toxic material)	1,00
<i>Sub-atmospheric Pressure</i>	Tidak ada indikasi vakum	1,00
<i>In/Near Flammable Range</i>	Tidak (Flash point tinggi, >suhu proses)	1,00
<i>Dust Explosion</i>	Tidak ada debu	1,00
<i>Relief Pressure</i>	Operasi tekanan menenga ke tinggi	1,20
<i>Low Temperature</i>	Tidak ada operasi kriogenik	1,00
<i>Quantity of Flammable Material</i>	Volume cukup besar, tapi long residue toidak mudah terbakar	1,10
<i>Corrosion and Erosion</i>	Long residue tidak menyebabkan fouling dan korosi	1,10
<i>Leakage(joint&packing)</i>	Banyak flange & valve	1,05
<i>Using Fire Equipment</i>	Ya (Karna menggunakan Furnace pada aliran proses)	1,10
<i>Hot Oil Heat Exchanger</i>	Ya	1,05
<i>Rotating Equipment</i>	Proses menggunakan pompa	1,05
Total F2		12,65

- g. Menentukan *process unit hazard factor* (F3) dengan persamaan
 $F1 = F1 \times F2$ (2)
- h. Setelah menentukan semua komponen, tentukan *Fire & Explosion Index* dengan persamaan:
 $F\&EI = MF \times F3$ (3)

Tabel 4 Penentuan *Special Process Hazard*

Kisaran F&EI	Tingkat Bahaya
1-60	Ringan
61-96	Moderat
97-127	Intermediate
128-158	Berat
159-ke atas	Parah

Setelah menyelesaikan tahapan menggunakan metode *Dow's Fire and Explosion Index*, selanjutnya adalah tahapan menggunakan metode *5 why's* sebagai berikut:

- Menentukan masalah yang ingin diselesaikan dengan jelas dan spesifik;
- Ajukan pertanyaan “mengapa” dan jawab pertanyaannya;
- Ulangi pertanyaan “mengapa” menggunakan jawaban dari pertanyaan sebelumnya sampai ke akar masalah;
- Setelah menentukan akar masalah, selanjutnya adalah identifikasi akar masalah;
- Berdasarkan akar masalah yang ditemukan, tentukan solusi yang tepat.

3. PEMBAHASAN

A. Perhitungan *Dow's Fire & Explosion Index* (F&EI)

F&EI merupakan suatu pendekatan yang konsisten untuk mengenal dan mengevaluasi potensi bahaya. Berikut merupakan langkah perhitungan yang diperlukan dalam menghitung F&EI berdasarkan pedoman *Dow's Fire and Explosion index*.

Tabel 5. Ringkasan Nilai Penalti F&EI

Parameter	Nilai	Deskripsi/Sumber
Material Factor (MF)	4	Berdasarkan Long Residue (Non-combustible, NF=1, NR=0) dari Tabel 1 Material Factor Determination Guide.
General Process Hazard Factor (F1)	2.40	Diperoleh dari penjumlahan nilai penalti <i>exothermic reaction</i> , <i>endothermic process</i> , <i>enclosed unit</i> , <i>access</i> , dan <i>drainage/spill control</i> (Tabel 2).
Special Process Hazard Factor (F2)	12.65	Diperoleh dari penjumlahan nilai penalti 12 komponen <i>special process hazard</i> seperti <i>toxic material</i> , <i>sub-atmospheric pressure</i> , <i>quantity of flammable material</i> , <i>hot oil</i> <i>heat exchanger</i> , dll. (Tabel 3).
Process Unit Hazard Factor (F3)	30.36	Hasil perkalian $F1 \times F2$.
Fire & Explosion Index (F&EI)	121.44	Hasil perkalian $MF \times F3$.

a. Penentuan Material Factor (MF)

Material Factor (MF) adalah nilai yang menggambarkan potensi energi yang dibebaskan saat terjadi kebakaran dan ledakan, yang dihasilkan dari pembakaran atau reaksi kimia lainnya. MF diperoleh dari *Nf* dan *Nr* yang berasal dari NFPA yang masing-masing menggambarkan

nilai *flammability* dan *reactivity(instability)*. Pada penelitian ini *feed* atau material yang digunakan adalah *Long residue* dengan *Flash point* 262°C yang mana jauh diatas 93,3°C atau tidak mudah terbakar yang mana dapat dilihat dari Tabel 1 *Material Factor Determination Guide* pada bab 2 menyatakan *Long Residue* adalah material *Non combustible (NFPA flammability rating)* atau $N_f = 1$ dan $N_r = 0$ dikarenakan *Long Residue* tidak reaktif dan bersifat stabil. Berdasarkan tabel *Material Factor Guide* didapatkan bahwa $MF=4$.

Nilai reaktivitas (NR) dapat diperoleh dari deskripsi kualitatif tentang ketidakstabilan (atau reaktivitas dengan air) dari zat, campuran atau senyawa pada suhu sekitar, sebagai berikut berdasarkan *Dow's Fire and Explosion Index Guide* [13]. $NR = 0$ mengindikasikan bahwa bahan umumnya stabil, bahkan dalam kondisi kebakaran. Kategori ini mencakup: • Bahan yang tidak bereaksi dengan air. • Bahan yang menunjukkan reaksi eksotermis pada suhu di atas 300 °C (572 °F) tetapi di bawah 500 °C (932 °F) saat diuji menggunakan *Differential Scanning Calorimeter (DSC)*. • Bahan yang tidak menunjukkan reaksi eksotermis pada suhu hingga 500 °C (932 °F) saat diuji dengan DSC.

$NR = 1$ menunjukkan bahwa bahan umumnya stabil, tetapi dapat menjadi tidak stabil pada suhu dan tekanan tinggi. Kategori ini mencakup: • Bahan yang dapat mengalami perubahan atau terurai ketika terpapar udara, cahaya, atau kelembapan. • Bahan yang menunjukkan reaksi eksotermis pada suhu di atas 150 °C (302 °F) tetapi di bawah 300 °C (572 °F). $NR = 2$ menunjukkan bahwa bahan dapat mengalami perubahan kimia yang signifikan pada suhu dan tekanan tertentu. Kategori ini mencakup: • Bahan yang menunjukkan reaksi eksotermis pada suhu di atas 150 °C (302 °F) saat diuji dengan *Differential Scanning Calorimeter (DSC)*. • Bahan yang dapat bereaksi keras dengan air atau membentuk campuran yang berpotensi meledak saat bersentuhan dengan air.

$NR = 3$ menunjukkan bahwa bahan dapat mengalami dekomposisi atau reaksi eksplosif, tetapi umumnya memerlukan sumber inisiasi yang kuat atau pemanasan dalam kondisi terkurung sebelum reaksi terjadi. Kategori ini mencakup: • Bahan yang sensitif terhadap guncangan termal atau mekanis pada suhu dan tekanan tinggi. • Bahan yang bereaksi secara eksplosif dengan air tanpa membutuhkan panas atau kondisi terkurung. $NR = 4$ menunjukkan bahwa bahan dapat meledak dengan sendirinya akibat dekomposisi atau reaksi eksplosif pada suhu dan tekanan normal. Kategori ini mencakup: • Bahan yang sangat sensitif terhadap guncangan termal atau mekanis, bahkan dalam kondisi suhu dan tekanan lingkungan.

NF (*Flammability Rating*) adalah ukuran tingkat kemudahan suatu bahan untuk terbakar. Nilai NF menunjukkan seberapa besar potensi suatu bahan untuk menyulut atau mempertahankan api, yang sangat penting dalam analisis risiko kebakaran dan ledakan di fasilitas industri. Semakin tinggi NF, semakin besar potensi kebakaran bahan tersebut, sehingga risiko yang diidentifikasi dalam analisis F&EI juga meningkat. NF dapat ditentukan dari sifat bahan tersebut, seperti: [13]. • Titik nyala (*Flash Point*) → Suhu di mana bahan mulai mengeluarkan uap yang dapat terbakar. • Batas ledakan (*Explosive Limits*) → Konsentrasi minimum dan maksimum bahan dalam udara yang dapat terbakar. • Suhu nyala sendiri (*Autoignition Temperature*) → Suhu minimum di mana bahan dapat terbakar tanpa sumber api eksternal. Setelah NF diperoleh, nilai ini digunakan dalam perhitungan *Material Factor (MF)* yang menjadi dasar analisis *Dow's F&EI* dalam menilai potensi bahaya kebakaran dan ledakan di suatu fasilitas industri.

b. Penentuan *General Process Hazard* (F1)

General Process Hazard adalah faktor utama yang berperan dalam menentukan besarnya kerugian dari insiden. *General Process Hazard* meliputi *exothermic chemical reaction, endothermic processes, enclosed or indoor process unit, acces, drainage spill control*. Setelah menguraikan poin penalti dari tiap-tiap faktor, hal yang selanjutnya dilakukan adalah

menjumlahkan poin penalti tersebut. $F1 = 1,00 + 0,20 + 0,45 + 0,25 + 0,50 = 2,40$. Setelah dijumlahkan, didapatkanlah hasil 2.40 untuk General Process Hazard.

c. Penentuan *Special Process Hazard* (F2)

Special Process Hazard adalah faktor yang dapat meningkatkan probabilitas insiden dan merupakan kondisi proses yang spesifik yang berdasarkan sejarah berkontribusi menjadi penyebab utama insiden kebakaran dan ledakan. *Special Process Hazards* terdiri atas 12 item: Total F2 didapat dari 12 beberapa komponen seperti pada tabel yang mana komponen tersebut diambil dari beberapa data seperti komponen pada *Process Flow Diagram* (PFD), komposisi feed dan lain-lain, sehingga setelah dijumlahkan, didapatlah total penalti dari *Special Process Hazard* yaitu 12.65.

d. Menentukan *Process Unit Hazard Factor* (F3)

Menghitung *Process Unit Hazard Factor*, menggunakan persamaan:

$$F3 = F1 \times F2 \quad F3 = 2,40 \times 12,65 = 30,36$$

Berdasarkan persamaan tersebut, didapatlah total penalti dari *Process Unit Hazard Factor* yaitu 30,36 yang mana nilai ini nantinya akan digunakan untuk mendapatkan nilai dari *Fire & Explosion Index*.

e. Menentukan Nilai *Fire & Explosion Index* (F&EI)

Nilai F&EI merupakan gambaran potensi bahaya yang ada dalam unit proses yang dapat dikategorikan berdasarkan tingkat bahaya, untuk mendapatkan nilai F&EI menggunakan persamaan:

$$F\&EI = MF \times F3, \quad F\&EI = 4 \times 30,36 = 121,44.$$

Kedua nilai dari *Process Unit Hazard Factor* (F3) dan *Material Factor* (MF) dikalikan sehingga mendapatkan nilai F&EI yang mana nilai nanti dapat diklasifikasikan berdasarkan tabel klasifikasi F&EI. Merujuk pada tabel klasifikasi bahaya, dapat ditentukan bahwa potensi bahaya yang dapat ditimbulkan dari analisis hasil F&EI masuk dalam golongan bahaya menengah (*Intermediate hazard*) yang berkisar antara 97-127.

f. Penentuan Radius Pajanan (*Radius of Exposure*)

Radius dimana semua peralatan pada jarak tersebut terkena efek atau dampak jika terjadi kebakaran dan ledakan. Nilai F&EI dapat dikonversi ke radius pajanan dengan persamaan:

$$\text{Radius pajanan (ft)} = 0,84 \times F\&EI$$

$$\begin{aligned} \text{Radius pajanan (ft)} &= 0,84 \times 121,44 \\ &= 102,96\text{ft} \end{aligned}$$

g. Penentuan Luas Daerah Pajanan (*Area of Exposure*)

Luas daerah pajanan ditentukan dari radius pajanan dengan menggunakan persamaan luas lingkaran:

$$\text{Area} = \pi \times (\text{radius})^2$$

$$\text{Area} = 3,14 \times (102,96)^2$$

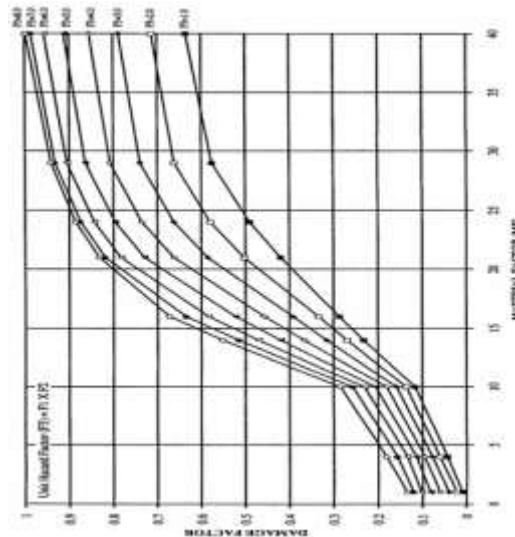
$$\text{Area} = 33,286\text{ft}$$

h. Penentuan Nilai Daerah Pajanan (*Replacement Value*)

Nilai penggantian (*replacement value*) dari seluruh peralatan dan isinya yang akan rusak atau hilang termasuk barang-barang inventaris jika terjadi kebakaran dan ledakan. Nilai daerah terpajan ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\text{Nilai pergantian} &= \text{Biaya asli} \times 0.84 \times \text{CEPCI} \\ \text{Nilai pergantian} &= \$200/\text{ft}^2 \times 0.84 \times 860 \\ \text{Nilai Pergantian} &= \$144,480.\end{aligned}$$

i. Perhitungan *Damage Factor*



Menentukan *Damage Factor* diperlukan nilai *Process Unit Hazard Factor* (F3) dan *Material Factor* (MF) yaitu F3 = 30,36 dan MF = 4. Setelah menentukan kedua nilai tersebut, kedua nilai dimasukkan dalam grafik seperti pada Gambar 1. Pada grafik, sumbu horizontal (x) = *Damage Factor* (0-1) sedangkan sumbu vertikal (y) = *Material Factor* (5-40) dan tiap kurva merepresentasikan nilai F3 (1-40). Langkah untuk menentukan *Damage Factor* adalah dengan menemukan garis kurva untuk F3 (30,36) dan lihat interseksi kurva F3 (30,36) dengan MF (4) di sumbu vertikal, dari titik itu, tarik ke sumbu x (*Damage Factor*) sehingga didapatkan nilai dari *Damage Factor* yaitu 0,39.

j. Tentukan Nilai *Base Maximum Probable Property Damage* (MPPD)

Nilai kerugian dasar adalah nilai kerugian secara teoritis berdasarkan luas daerah terpajan. Nilai kerugian dasar ditentukan berdasarkan nilai daerah terpajan dan faktor kerusakan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\text{Base MPPD} &= \text{Nilai daerah pajanan} \times \text{Damage Factor} \\ \text{Base MPPD} &= \$144,480. \times 0,39 \\ \text{Base MPPD} &= \$56,347.\end{aligned}$$

k. Perhitungan Faktor Pengendali Nilai Kerugian (LCCF)

Loss control credit factor (LCCF) merupakan faktor pengendali kerugian (*loss control*) yang dapat mencegah atau membatasi kerugian jika terjadi kebakaran dan ledakan. LCCF terdiri atas tiga kategori yaitu: *process control* (C1), *material control* (C2), *fire protection* (C3). Jika tidak ada pengendalian kerugian, nilai kredit adalah 1. LCCF ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\text{LCCF} &= \text{C1} \times \text{C2} \times \text{C3} \\ \text{LCCF} &= 0,95 \times 0,96 \times 0,90 \\ \text{LCCF} &= 0,82 \text{ (dibulatkan)}\end{aligned}$$

Poin penalti pada C1, C2 dan C3 didapatkan dari *Dow's F&EI guide* yang menjelaskan bahwa pada unit PT XYZ terdapat *Emergency Shutdown System* yang mengindikasikan bahwa C1 =

0,95, untuk nilai C2 didapat dari komponen *Remote Control Valve*, sehingga didapat nilai C2 = 0,96, dan nilai C3 = 0,90 didapat dari komponen Hydrant yang terletak pada unit proses.

1. Perhitungan Actual Base MPPD

Nilai *Actual Base MPPD* adalah nilai kerusakan material dan peralatan yang sebenarnya jika terjadi kebakaran dan ledakan yang dipengaruhi dengan adanya faktor pengendali nilai kerugian. Nilai *Actual Base MPPD* dapat diperoleh dengan persamaan:

$$\text{Actual Base MPPD} = \text{Base MPPD} \times \text{LCCF}$$

$$\text{Actual Base MPPD} = \$56,347 \times 0,82$$

$$\text{Actual Base MPPD} = \$46.204,54$$

Kesimpulan perhitungan nilai F&EI berdasarkan Tabel 5, yaitu nilai F&EI sebesar 121,44 mengindikasikan bahwa unit Heat Exchanger di PT XYZ memiliki tingkat bahaya "Menengah" (*Intermediate hazard*), sesuai dengan kategori *Dow's F&EI* pada Tabel 4 (97-127). Nilai F&EI ini menunjukkan bahwa unit HE memerlukan perhatian serius dan kontrol risiko yang ketat, meskipun tidak termasuk dalam kategori Berat atau Parah. Klasifikasi ini menunjukkan bahwa unit tersebut memerlukan perhatian serius dalam manajemen risikonya, tidak termasuk kategori bahaya ringan namun juga tidak pada tingkat yang paling parah (berat/parah >128). Secara benchmarking, nilai 121,44 lebih tinggi dibandingkan studi serupa pada unit Primary Reformer di PT Pupuk Sriwidjaja yang juga menggunakan F&EI. Hal ini menegaskan bahwa unit proses penukar panas yang menangani material panas/hydrocarbon di kilang memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi. Estimasi kerugian material sebesar \$46.204,54 memberikan gambaran kuantitatif dampak finansial dari potensi insiden, yang dapat menjadi dasar pertimbangan investasi dalam upaya mitigasi.

B. Analisis Bahaya Kebakaran Menggunakan Metode 5 Why's

a. Deskripsi Skenario Kasus

Berdasarkan data HAZOP dan tinjauan proses, telah disusun lima skenario kasus potensial kebakaran yang melibatkan *Heat Exchanger* pada unit HVU. Masing-masing skenario dianalisis menggunakan pendekatan 5 *Why's*, dengan rincian sebagai berikut:

- Kasus 1: Kebocoran hidrokarbon dari *tube Heat Exchanger* akibat *overpressure*.
- Kasus 2: Overheating pada *shell Heat Exchanger* karena kegagalan kontrol temperatur.
- Kasus 3: Pecahnya outlet *Heat Exchanger* karena *thermal shock*.
- Kasus 4: Terjadinya percikan api dari area sekitar *Heat Exchanger*.
- Kasus 5: *Flame-out Furnace* memicu tekanan balik dan kebocoran *Heat Exchanger*.

b. Penerapan Metode 5 Why's

Metode 5 *Why's* diterapkan dengan menyusun pertanyaan “mengapa” secara berurutan hingga ditemukan akar penyebab dari masing-masing skenario. Tabel 6 berikut salah satu contoh penerapan metode 5 *Why's*.

Tabel 6 Kasus 1. Kebocoran Hidrokarbon panas dari *Heat Exchanger*

Pertanyaan	Jawaban
Mengapa terjadi kebakaran?	Karena terjadi kebocoran hidrokarbon panas dari <i>Heat Exchanger</i> .
Mengapa terjadi kebocoran?	Karena tube <i>Heat Exchanger</i> pecah.
Mengapa tube pecah?	Karena tekanan internal terlalu tinggi akibat <i>Fouling</i> .
Mengapa terjadi <i>Fouling</i> ?	Karena tidak dilakukan pembersihan berkala.
Mengapa tidak dilakukan pembersihan?	Karena tidak ada program maintenance rutin untuk cleaning.

Tabel 7 Kasus 2. Overheating pada Sheel Heat Exchanger

Pertanyaan	Jawaban
Kenapa terjadi kebakaran?	Karena <i>Overheating</i> menyebabkan kebakaran
Kenapa terjadi <i>Overheating</i> ?	Karena suhu fluida melebihi batas
Kenapa suhu fluida melebihi batas?	Karena sensor temperatur rusak
Kenapa sensor temperatur rusak?	Karena tidak dikalibrasi secara rutin
Kenapa tidak ada kalibrasi rutin?	Karena tidak ada program <i>Maintenance</i> terjadwal

Tabel 8 Kasus 3. Pipa Outlet Heat Exchanger Pecah

Pertanyaan	Jawaban
Kenapa terjadi kebakaran?	Karena Outlet <i>Heat Exchanger</i> pecah
Kenapa Outlet <i>Heat Exchanger</i> pecah?	Karena ekspansi logam berlebihan
Kenapa ekspansi logam berlebihan?	Karena lonjakan suhu (<i>Thermal shock</i>)
Kenapa terjadi <i>Thermal shock</i> ?	Karena <i>startup shutdown</i> tidak dikontrol
Kenapa <i>startup shutdown</i> tidak dikontrol?	Karena operator tidak mengikuti SOP

Tabel 9 Kasus 4. Ignition Source di area Heat Exchanger

Pertanyaan	Jawaban
Kenapa terjadi kebakaran?	Karena ada percikan dari <i>Electric Panel</i>
Kenapa ada percikan dari electric panel?	Karena <i>Grounding</i> tidak efektif
Kenapa <i>Grounding</i> tidak efektif?	Karena kabel terbuka di sekitar <i>Heat Eexchanger</i>
Kenapa ada kabel terbuka di sekitar <i>Heat Exchanger</i> ?	Karena area tidak dirancang tahan api
Kenapa area tidak dirancang tahan api?	Karena tidak ada inspeksi area klasifikasi zona

Tabel 10 Kasus 5. Flame-out Furnace

Pertanyaan	Jawaban
Kenapa terjadi kebakaran?	Karena terjadinya <i>Flame-out</i>
Kenapa terjadi <i>Flame-out</i> ?	Karena <i>burner</i> mati mendadak
Kenapa <i>Burner</i> mati mendadak?	Karena gangguan suplai bahan bakar
Kenapa terjadi gangguan suplai bahan bakar?	Karena <i>valve stuck</i> di jalur <i>fuel</i>
Kenapa <i>valve stuck</i> di jalur <i>fuel</i> ?	Karena <i>valve</i> tidak diuji secara periodik.

Dalam setiap kasus, pertanyaan "mengapa?" diajukan secara berulang hingga mencapai penyebab mendasar yang bersifat sistemik, seperti kegagalan pemeliharaan, kekurangan prosedur operasional (SOP), atau penurunan kesadaran keselamatan. Analisis serupa dilakukan untuk masing-masing skenario yang telah diidentifikasi.

c. Identifikasi Akar Masalah

Analisis dari kelima skenario memperoleh beberapa akar penyebab utama potensi kebakaran pada *Heat Exchanger*, yaitu: 1. Kegagalan sistem maintenance (tidak adanya inspeksi dan pembersihan fouling secara rutin). 2. Kegagalan instrumentasi (sensor suhu dan tekanan tidak dikalibrasi). 3. Ketidaksesuaian operasional (pengoperasian di luar batas desain). 4. Kelemahan sistem deteksi dan alarm (tidak tersedia ESD, *flame detector*). 5. Kurangnya pelatihan operator (tidak memahami SOP atau kondisi kritis alat). Akar masalah ini menunjukkan perlunya perbaikan baik dari sisi teknis maupun manajerial, khususnya dalam sistem pengendalian risiko.

d. Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan akar masalah yang ditemukan melalui metode 5 *Why's*, berikut adalah beberapa rekomendasi untuk mengurangi risiko kebakaran pada heat exchanger: 1. Peningkatan program maintenance preventif: Menjadwalkan inspeksi dan pembersihan rutin (CIP) secara berkala pada *Heat Exchanger*, termasuk penggantian suku cadang yang rentan aus. 2. Pemutakhiran sistem instrumentasi: Kalibrasi dan pemeliharaan sensor suhu dan tekanan secara rutin agar deteksi kondisi abnormal dapat dilakukan sejak dini. 3. Pelatihan ulang operator: Meningkatkan pelatihan mengenai respon darurat dan implementasi SOP terkait pengoperasian dan pemeliharaan *Heat Exchanger*. 4. Evaluasi desain peralatan: Melakukan evaluasi teknis terhadap desain *Heat Exchanger* yang telah beroperasi dalam jangka waktu tertentu untuk menentukan apakah diperlukan modifikasi atau penggantian peralatan. 5. Memasang sistem deteksi kebakaran (*flame detector*) dan *valve shutdown* otomatis untuk kondisi darurat.

Analisis 5 *Why's* dari lima skenario insiden potensial mengungkap akar masalah yang bersifat sistemik dan manajerial, bukan hanya teknis. Lima skenario potensial penyebab kebakaran pada *Heat Exchanger* berhasil diidentifikasi: kebocoran hidrokarbon panas akibat *overpressure*, *overheating* akibat kegagalan kontrol temperatur, pecahnya pipa *outlet Heat Exchanger* karena *thermal shock*, percikan api dari area sekitar Heat Exchanger, dan *flame-out furnace* yang memicu tekanan balik. Akar penyebab utama meliputi kegagalan sistem pemeliharaan preventif (tidak ada inspeksi, pembersihan *fouling* dan kegagalan instrumentasi seperti kalibrasi sensor rutin), ketidaksesuaian operasional (operator tidak mengikuti SOP selama startup/shutdown), dan kelemahan desain zona/proteksi (*grounding* tidak efektif, tidak adanya inspeksi klasifikasi zona), kelemahan sistem deteksi dan alarm, serta kurangnya pelatihan operator.

C. Benchmarking dan Perbandingan

Klasifikasi "*Intermediate hazard*" pada F&EI (121,44) menempatkan unit ini pada risiko yang signifikan, menuntut implementasi pengamanan yang memadai. Sebagai perbandingan, nilai F&EI yang lebih rendah (misalnya <60) akan menunjukkan bahaya ringan, sementara nilai di atas 159 menunjukkan bahaya parah. Data ini dapat dibandingkan dengan nilai F&EI dari unit serupa di industri lain atau standar keselamatan untuk menilai posisi relatif risiko PT XYZ. Studi oleh [5] pada *Primary Reformer 101-B* di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang menunjukkan bahwa bahkan unit dengan nilai F&EI yang signifikan masih dapat mengalami insiden berulang, menggarisbawahi perlunya mitigasi yang efektif.

Akar masalah yang teridentifikasi melalui 5 *Why's* (misalnya, kegagalan pemeliharaan, instrumentasi, dan pelatihan) selaras dengan temuan umum dalam insiden keselamatan proses di berbagai industri. Laporan investigasi seperti insiden *West Fertilizer Company* [4] sering kali menyoroti akar masalah yang serupa, menegaskan bahwa kegagalan sistemik dalam manajemen dan operasional berkontribusi besar pada kecelakaan serius. Ini menunjukkan bahwa meskipun unit ini tergolong "*Intermediate hazard*", akar masalahnya bersifat fundamental dan memerlukan perbaikan menyeluruh yang tidak hanya berfokus pada perbaikan fisik tetapi juga perbaikan proses dan SDM.

D. Kontribusi Penelitian

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan metodologi terintegrasi yang efektif untuk penilaian risiko kebakaran dan ledakan pada fasilitas industri, menawarkan pemahaman yang mendalam baik dari segi kuantifikasi risiko maupun identifikasi akar penyebab. Hasil studi ini dapat dijadikan acuan praktis untuk meningkatkan manajemen keselamatan proses.

E. Rekomendasi Penelitian Lanjut

Rekomendasi penelitian lanjutan selain menggunakan metode 5 Why's dan *Dow's Fire and Explosion Index* (F&EI) antara lain;

1. Menerapkan analisis serupa pada unit proses kritis lain di kilang atau fasilitas sejenis untuk membangun profil risiko yang lebih menyeluruh.
2. Mengintegrasikan teknik penilaian risiko lanjutan seperti Layer of Protection Analysis (LOPA) atau Quantitative Risk Assessment (QRA) untuk validasi dan penentuan tingkat integritas keselamatan (SIL) dari *safeguard* yang ada.
3. Melakukan analisis *cost-benefit* dari rekomendasi mitigasi yang diusulkan untuk mengoptimalkan alokasi sumber daya dalam upaya peningkatan keselamatan.
4. Mengembangkan model penilaian risiko dinamis atau sistem prediktif yang memanfaatkan data operasional *real-time* untuk memantau perubahan profil risiko.
5. Mempelajari lebih dalam faktor manusia dan budaya keselamatan organisasi sebagai bagian integral dari akar masalah sistemik.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan mengenai “Analisis Potensi Kebakaran pada Heat Exchanger Menggunakan Metode 5 Why's dan *Dow's Fire and Explosion Index* (F&EI) di Kilang”, sehingga dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa identifikasi akar masalah melalui metode 5 Why's, diketahui bahwa akar penyebab potensi kebakaran pada *Heat Exchanger* adalah 5 kasus yaitu kebocoran hidrokarbon panas, *Overheat*, pipa outlet *Heat Exchanger* pecah, *Ignition source* dan *Flame-out* di *Furnace*. Hal ini dapat menimbulkan kebocoran fluida mudah terbakar dan berpotensi menyebabkan kebakaran atau ledakan. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai *Fire and Explosion Index* (F&EI) untuk unit *Heat Exchanger* berada pada kategori bahaya menengah (*Intermediate hazard*) dengan nilai indeks sebesar 121,44. Nilai estimasi kerugian material akibat kejadian mencapai USD \$46.204,54 yang menunjukkan potensi bahaya kebakaran di area ini cukup signifikan dan perlu dikendalikan. Berdasarkan hasil analisis, rekomendasi mitigasi risiko yang disarankan mencakup: peningkatan frekuensi inspeksi peralatan, pemasangan sistem deteksi kebocoran, pembaruan Prosedur Operasi Standar (SOP), serta pelatihan intensif bagi operator dan personel terkait keselamatan kerja.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Baihaqi, R., & Setiawan, H. (2018). Analisis Risiko Keselamatan Kerja pada Industri Minyak dan Gas. Jakarta: Penerbit Teknik Keselamatan.
- [2] Sutopo, J.W., & Ratriwardhani, R. A., (2022). Identifikasi Bahaya, Penilaian dan Pengendalian Risiko Pada Proses Peleburan Baja di CV Sumber Wahyu dengan Metode HIRADC., Surakarta Manajemen Journal, Vol 4 No. 1, hal: 55 – 65.
- [3] Yaqin, R. I., Huda, M., Tumpu, M., Priharanto, Y. E., Siahaan, J. P., Demeianto, B., Priyambodo, B. H., & Umar, M. L. (2022). Analisa Perpindahan Panas Heat Exchanger Mesin Induk (Studi Kasus: Km. Sumber Mutiara). JTT (Jurnal Teknologi Terapan), 8(1), 53. <https://doi.org/10.31884/jtt.v8i1.355>
- [4] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB) (2016, January). *Investigation Report: West Fertilizer Company Fire and Explosion (Report No. 2013-02-I-TX)*. Washington, D.C.: U.S. CSB.
- [5] Linawati, S. W., & Purba, I. G. (2020). Analysis of the Potential Fire and Explosion and Losses with Dow's Fire and Explosion Index of Primary Reformer 101-B in Pt Pupuk Sriwidjaja Palembang. 25 (Sicph <https://doi.org/10.2991/ahsr.k.200612.065> 2019), 454–460.

- [6] Widodo, P. (2019). *Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja: Sistem dan Aplikasi di Tempat Kerja*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- [7] Haryanto, T. (2021). *Manajemen Risiko K3 di Industri Proses*. Yogyakarta: Pustaka K3.
- [8] Irhami, Pandria. (2022). *Implementasi Metode 5 Why's dalam Manajemen Risiko Industri*. Jakarta: Penerbit Keselamatan Kerja.
- [9] Santoso, S., Sarnadi, & Ika Apriasty. (2022). Penerapan Metode Fishbone Diagram and 5 Why'S Analysis Untuk Meningkatkan Kualitas Produk Pakaian Jadi. *VISIONIDA: Jurnal Manajemen Dan Bisnis*, 8(2), 27–41
- [10] Hendershot, D. C. (1997). *Dow's Fire and Explosion Index: A Comprehensive Guide to Process Safety*. AIChE.
- [11] Kuswardana, A., Mayangsari, N. E., & Amrullah, H. N. (2017). Analisis Penyebab Kecelakaan Kerja Menggunakan Metode RCA (Fishbone Diagram Method And 5 – Why Analysis) di PT . PAL Indonesia. *Conference on Safety Engineering and Its Application*, 141–146.
- [12] Rahmatullah, A. J., Hambali, F. R., & Fadilah, M. I. (2024). Analisis Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Mekanik pada Saat Bekerja di Bengkel Motor AMRC Bandung dengan Metode 5 Whys dan Fishbone Diagram. *Neraca: Jurnal Ekonomi, Manajemen Dan Akuntansi*, 2(9), 726–731.
- [13] AIChE. (1994). *Process Safety Progress: Dow's Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide*. American Institute of Chemical Engineers.

Daftar simbol

- MF = *Material Factor*
- NF = *Normal Factor*
- NR = *NF Refinement Factor*
- F&EI = *Fire and Explosion Index*
- F3 = *Procces unit hazard factor*
- MF = *Material factor*