

Analisis Akar Penyebab Ledakan *Reformer* Pada Unit *Hydrogen Plant* Menggunakan Metode *Fault Tree Analysis*

Ryan Putra Hidayat¹, Nora Amelia Novitrie^{2*} dan Agung Nugroho³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik
Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

*E-mail: noranovitrie@ppns.ac.id

Abstrak

Unit *hydrogen plant* merupakan bagian penting dari sistem produksi dalam industri pengolahan pelumas yang berfungsi untuk menyuplai gas hidrogen berkualitas tinggi ke unit *hydrofinishing*. Gas hidrogen termasuk dalam kategori gas IIC yang memiliki potensi ledakan tinggi akibat sifatnya yang sangat mudah terbakar. Salah satu peralatan paling krusial dan berisiko tinggi dalam unit ini adalah *reformer*, karena beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi serta melibatkan reaksi kimia yang sensitif. Gangguan pada proses reformasi dapat menimbulkan risiko keselamatan seperti tekanan berlebih, degradasi katalis, ketidakstabilan nyala api, hingga pecahnya tabung. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis akar penyebab ledakan pada *reformer* dengan menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA). FTA dipilih karena mampu menggambarkan hubungan sebab-akibat secara sistematis melalui pendekatan *top-down*, dimulai dari kejadian puncak (*top event*) hingga ke akar penyebab (*basic cause*). Berdasarkan hasil penyusunan diagram FTA, didapatkan sebanyak 46 *minimal cut set* dan 13 *basic cause*, antara lain: jadwal inspeksi tidak teratur, *lifetime* pada katalis, gas proses terkontaminasi, *lifetime* pada *pressure transmitter*, kurangnya perawatan, material tidak sesuai spesifikasi, aliran gas proses tinggi, tidak sesuai SOP, kurangnya pengawasan, pasokan nitrogen habis, tidak dilakukan monitoring, isolasi kabel rusak, dan kabel tidak sesuai standar. Rekomendasi pengendalian risiko berdasarkan prinsip hierarki pengendalian yang dapat dilakukan mencakup tingkat substitusi yaitu mengganti material dan komponen sesuai dengan spesifikasi, tingkat rekayasa teknik dengan menambah *flow control valve*, dan tingkat kontrol administrasi dengan menetapkan jadwal inspeksi ataupun perawatan, kepatuhan SOP, dan pengadaan pelatihan.

Kata Kunci: *Fault Tree Analysis* (FTA), *Hydrogen Plant*, Risiko Ledakan, *Reformer*

Abstract

The *hydrogen plant unit* is a crucial part of the production system in the lubricant processing industry, functioning to supply high-quality hydrogen gas to the *hydrofinishing unit*. Hydrogen gas is classified as an IIC gas, which has a high explosion potential due to its highly flammable nature. One of the most critical and high-risk equipment in this unit is the *reformer*, which operates at high temperatures and pressures and involves sensitive chemical reactions. Disruptions to the reforming process can pose safety risks such as overpressure, catalyst degradation, flame instability, and tube rupture. Therefore, this study aims to analyze the root cause of explosions in the *reformer* using the *Fault Tree Analysis* (FTA) method. FTA is chosen because it can systematically describe the cause-and-effect relationships through a *top-down* approach, starting from the *top event* to the *basic cause*. Based on the FTA diagram results, 46 *minimum cut sets* and 13 *basic causes* were identified, including irregular inspection schedules, catalyst *lifetime*, contaminated process gas, *pressure transmitter lifetime*, lack of maintenance, material not meeting specifications, high process gas flow, non-compliance with SOPs, lack of supervision, depleted nitrogen supply, lack of monitoring, damaged cable insulation, and non-standard cables. Recommendations for risk control based on the hierarchy of control principles that can be implemented include substitution level by replacing materials and components according to specifications, engineering level by adding flow control valves, and administrative control level by establishing inspection and maintenance schedules, adhering to SOPs, and providing training.

Keywords: *Fault Tree Analysis* (FTA), *Hydrogen Plant*, Explosion Risk, *Reformer*

1. PENDAHULUAN

Perusahaan pengolahan minyak pelumas merupakan perusahaan yang bergerak dalam bidang produksi pengolahan minyak pelumas bekas (*used oil*) menjadi pelumas murni (*lube base*) siap pakai. Perusahaan ini telah beroperasi lebih dari 25 tahun dan memiliki kapasitas produksi 40.000 MT per tahun. Dalam proses pengelolaan produknya, proses akhir produksi terjadi pada area *hydrofinishing* dimana terdapat proses pemurnian untuk perbaikan

warna *feed* terhadap kandungan kontaminan residu dan asam organik. Proses ini sangat membutuhkan hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi yang diambil dari unit *hydrogen plant*.

Hydrogen plant merupakan unit yang berfungsi untuk memproduksi gas hidrogen (H_2) dengan bahan baku *natural* yang menghasilkan konsentrasi akhir mencapai 99,99%. Hidrogen dengan bahasa latin *hydrogenium*, merupakan unsur kimia dengan simbol H dan nomor 1 pada tabel periodik (Tarigan dkk., 2024). Hidrogen memiliki sifat gas yang tidak berwarna, tidak berasa, tidak berbau serta memiliki sifat yang sangat mudah terbakar (Hasan & Widayat, 2022). Gas hidrogen termasuk dalam klasifikasi kelompok gas IIC, yang merupakan kategori paling berbahaya karena memiliki potensi ledakan yang tinggi, sehingga memerlukan penggunaan peralatan dengan kelas perlindungan tertinggi dan biaya paling tinggi (Buyukkidan dkk., 2021). Ledakan berpotensi terjadi apabila gas mudah terbakar seperti hidrogen bercampur dengan oksigen dalam rasio tertentu dan kemudian bertemu dengan sumber penyalan (Fauzia dkk., 2022). Unit *hydrogen plant* juga diklasifikasikan sebagai area berbahaya (*hazardous area*) oleh perusahaan, sehingga akses ke area tersebut dibatasi dan hanya diperbolehkan bagi personel tertentu guna mencegah terjadinya pelanggaran prosedur operasional.

Dari beberapa peralatan yang terdapat di unit *hydrogen plant*, peralatan *reformer* dipilih sebagai fokus utama dalam analisis akar penyebab karena merupakan komponen inti yang berperan langsung dalam proses reformasi untuk menghasilkan gas hidrogen. Proses reformasi ini melibatkan reaksi kimia yang sangat sensitif terhadap gangguan operasi, serta menghasilkan beragam keluaran gas salah satunya hidrogen. Selain itu, *reformer* beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi, yang menjadikannya peralatan paling kritis dalam sistem produksi. Kondisi tersebut menimbulkan risiko keselamatan yang signifikan, seperti tekanan berlebih, degradasi katalis, ketidakstabilan nyala api pada *burner*, serta potensi pecahnya tabung akibat kelelahan material (Parapat dkk., 2025).

Berdasarkan penjelasan yang telah diuraikan diatas, terdapat risiko yang perlu mendapat perhatian pada unit *hydrogen plant* yaitu risiko ledakan khususnya pada peralatan *reformer*. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis penyebab kejadian ataupun kegagalan tersebut menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA). Metode FTA dipilih dalam penelitian ini karena menggunakan pendekatan *top-down*, yaitu dimulai dari asumsi terjadinya kegagalan pada kejadian puncak (*top event*), yang selanjutnya dianalisis secara sistematis untuk mengidentifikasi akar penyebab hingga mencapai level penyebab dasar (Juhindra & Nugraheni, 2023).

2. METODE







Fault Tree Analysis (FTA) adalah salah satu metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab utama serta menilai probabilitas terjadinya suatu kejadian yang tidak diharapkan (Salsabila dkk., 2021). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi berbagai risiko yang berpotensi menyebabkan kegagalan pada proses produksi (Perdana dkk., 2024). Dalam menganalisis hubungan antara sebab-akibat dari suatu risiko ketidakhandalan suatu sistem, teknik analisis *Fault Tree Analysis* (FTA) sering menjadi pilihan metode yang digunakan (Duyo, 2020). Analisis ini dengan pendekatan dari level atas menuju bawah, dimulai dengan menganggap bahwa suatu kejadian puncak (*top event*) atau kejadian utama telah gagal, kemudian menganalisis faktor-faktor penyebabnya hingga diperoleh akar penyebab kegagalan dasar (*basic cause*) (Dahlan dkk., 2021).

Menurut (Analysa & Rahma, 2019) dalam pembuatan FTA terdapat langkah-langkah yang harus diikuti sebagai acuan dalam melakukan analisis, yaitu sebagai berikut:

1. Menetapkan kejadian puncak (*top event*) yang telah ditentukan sebelumnya sebagai fokus analisis.
2. Menentukan *intermediate event* tingkat pertama yang secara langsung berkaitan dengan kejadian puncak (*top event*).
3. Menentukan hubungan antara *intermediate event* tingkat pertama dengan kejadian puncak (*top event*) menggunakan gerbang logika (*logic gate*), seperti AND *gate* dan OR *gate*.
4. Menentukan *intermediate event* tingkat kedua yang menjadi penyebab *intermediate event* tingkat pertama.
5. Menetapkan hubungan antara *intermediate event* tingkat kedua dengan *intermediate event* tingkat pertama dengan bantuan gerbang logika (*logic gate*) sebagaimana pada tahap sebelumnya.
6. Melanjutkan proses hingga mencapai *basic cause* atau kejadian dasar yang menjadi akar penyebab.






Metode FTA memiliki *event symbol* dan *gate symbol* yang berfungsi untuk mempermudah dalam mengidentifikasi suatu kejadian berdasarkan sifat dan hubungan logisnya, sehingga analisis terhadap penyebab kegagalan pada sistem dapat dilakukan secara sistematis dan terstruktur (Ericson, 2005). Tabel 1 menyajikan *event symbol* FTA beserta deskripsinya, sedangkan Tabel 2 menunjukkan *gate symbol* FTA beserta deskripsinya.

Tabel 1. *Event Symbol* FTA

<i>Event Symbol</i>	<i>Type Symbol</i>	Deskripsi
	<i>Node text box</i>	Berisi teks untuk semua <i>fault tree nodes</i> . <i>Nodes symbol</i> berada di bawah <i>text box</i>
	<i>Primary failure/basic cause</i>	Simbol untuk kegagalan komponen dasar, mode kegagalan utama, inheren, dari suatu komponen. Peristiwa kegagalan acak
	<i>Secondary failure/undeveloped event</i>	Simbol untuk kegagalan yang disebabkan secara eksternal atau mode kegagalan yang dapat dikembangkan secara lebih rinci jika diinginkan
	<i>Normal event/house event</i>	Simbol untuk peristiwa yang diperkirakan akan terjadi sebagai bagian dari operasi sistem normal
	<i>Conditioning event,</i>	Simbol untuk pembatasan atau probabilitas bersyarat
	<i>Transfer symbol</i>	Menunjukkan di mana sebuah cabang atau sub-pohon ditandai untuk penggunaan yang sama di tempat lain dalam pohon. Simbol <i>in</i> dan <i>out</i> atau ke/dari

Pada Tabel 1 menunjukkan tentang *event symbol* pada *Fault Tree Analysis* (FTA). *Event symbol* menunjukkan bahwa kejadian tersebut merupakan bagian dari *basic cause*, *intermediate event*, atau lainnya. *Event symbol* tersebut membantu dalam mengidentifikasi serta memahami sifat setiap kejadian yang terjadi dalam suatu sistem (Wasahua dkk., 2021).

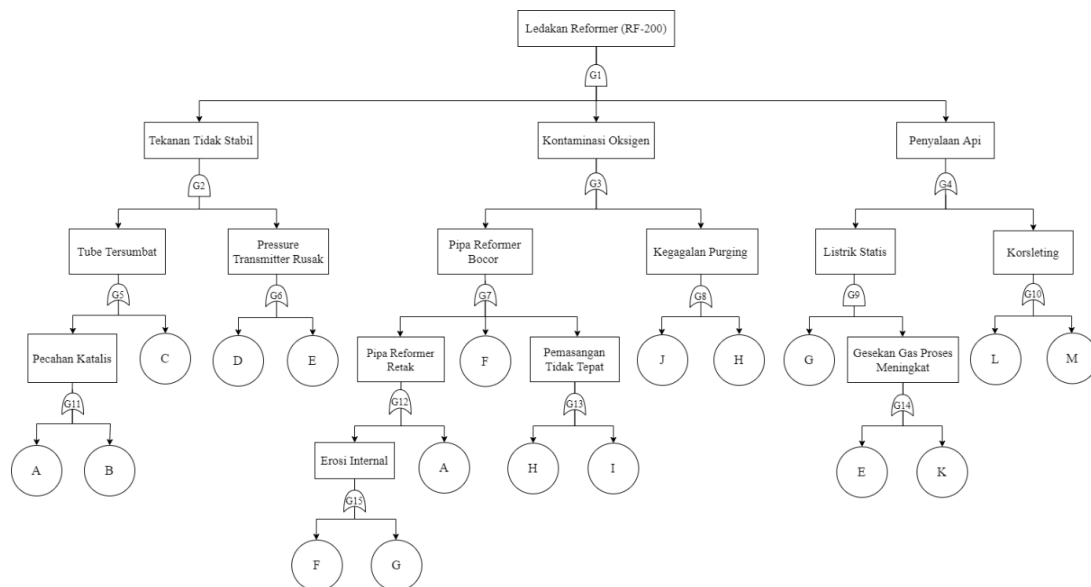
Tabel 2. *Gate Symbol* FTA

<i>Gate Symbol</i>	<i>Type Gate</i>	Deskripsi
	<i>AND Gate</i>	<i>Output</i> hanya terjadi jika semua input terjadi bersamaan.
	<i>OR Gate</i>	<i>Output</i> hanya terjadi jika setidaknya salah satu input terjadi.
	<i>Priority AND Gate</i>	<i>Output</i> hanya terjadi jika semua <i>input</i> terjadi bersamaan, tetapi dalam urutan tertentu (<i>input</i> 1 harus terjadi sebelum 2)
	<i>Exclusive OR Gate</i>	<i>Output</i> hanya terjadi jika setidaknya salah satu <i>input</i> terjadi, tetapi tidak keduanya.
	<i>Inhibit Gate</i>	<i>Output</i> hanya terjadi jika peristiwa <i>input</i> terjadi dan kondisi bawaan terpenuhi.

Pada Tabel 2 menunjukkan tentang *gate symbol* pada *Fault Tree Analysis* (FTA). *Gate symbol* digunakan untuk menggambarkan hubungan antar kejadian dalam suatu sistem, di mana setiap kejadian dapat secara sendiri maupun bersamaan memicu terjadinya kejadian lainnya (Syarifudin & Putra, 2021). FTA disusun dengan tujuan untuk mengidentifikasi *minimal cut set*. *Minimal cut set* adalah sekumpulan kejadian dasar (*basic cause*) atau kombinasi dari *basic event* yang paling sederhana yang mampu menimbulkan terjadinya kejadian puncak (*top event*) (Hardiansah dkk., 2023). *Minimal cut set* sangat berguna untuk menentukan tingkatan dimana kecelakaan dapat terjadi. Sementara itu, *cut set* sendiri didefinisikan sebagai kejadian dasar (*basic cause*) yang jika terjadi secara simultan dapat menyebabkan terjadinya kejadian puncak (*top event*) (Suryaningrum dkk., 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyusunan diagram *Fault Tree Analysis* (FTA) diawali dengan penetapan sebuah *top event* yang menampilkan sebuah kejadian atau kondisi suatu sistem yang nantinya akan diturunkan menjadi beberapa penyebab kejadian. Penentuan *top event* pada penelitian ini berdasarkan identifikasi bahaya pada perusahaan dan hasil *brainstorming* dengan tenaga ahli (*expert*). Kejadian puncak (*top event*) yang digunakan dalam proses penyusunan diagram FTA yaitu ledakan pada peralatan *reformer*.



Gambar 1. Diagram *Fault Tree Analysis* Ledakan pada *Reformer*

Gambar 1 menunjukkan bahwa ledakan pada *reformer* merupakan kejadian puncak (*top event*) dari *Fault Tree Analysis* (FTA). Setiap *intermediate event* digambarkan menggunakan simbol persegi panjang yang mewakili setiap kejadian yang berbeda-beda, setelah itu dilakukan analisis lebih lanjut untuk menelusuri penyebab dasarnya (*basic cause*). Terdapat dua jenis *gate symbol* yaitu berupa AND *gate* yang ditunjukkan pada G1 dan OR *gate* yang ditunjukkan pada G2. Dalam diagram FTA, kombinasi antara simbol OR *gate* dan AND *gate* digunakan untuk menjelaskan bagaimana *intermediate event* terbentuk, dan masing-masing diberi kode untuk mempermudah proses identifikasi *minimal cut set*. Simbol lingkaran menunjukkan akar penyebab (*basic cause*) yang tidak dapat dijabarkan lebih lanjut. Berdasarkan hal tersebut, dapat diidentifikasi bahwa kegagalan yang mengarah pada *top event* berasal dari sejumlah *basic cause*, salah satunya adalah jadwal inspeksi tidak teratur (kode A). Dari gambar tersebut, dapat disimpulkan bahwa *basic cause* dari ledakan pada *reformer* adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Keterangan *Basic Cause*

Kode	<i>Basic Cause</i>
A	Jadwal inspeksi tidak teratur
B	<i>Lifetime</i> pada katalis
C	Gas proses terkontaminasi
D	<i>Lifetime</i> pada <i>pressure transmitter</i>
E	Kurangnya perawatan
F	Material tidak sesuai spesifikasi
G	Aliran gas proses tinggi
H	Tidak sesuai SOP
I	Kurangnya pengawasan
J	Pasokan nitrogen habis
K	Tidak dilakukan monitoring
L	Isolasi kabel rusak
M	Kabel tidak sesuai standar

Tabel 3 menyajikan keterangan *basic cause* yang telah diklasifikasikan berdasarkan penamaan kode A hingga M dengan jumlah 13 *basic cause*, masing-masing mewakili penyebab yang dapat berkontribusi terhadap terjadinya *top event*, yaitu ledakan pada *reformer*. Faktor-faktor tersebut mencakup aspek teknis, seperti material tidak sesuai spesifikasi (kode F), *lifetime* pada *pressure transmitter* (kode D), hingga faktor prosedural seperti tidak sesuai SOP (kode H) dan kurangnya pengawasan (kode I). Pemberian kode ini bertujuan untuk mempermudah proses identifikasi pada *Fault Tree Analysis* (FTA), khususnya dalam penentuan *minimal cut set* pada bagian bawah ini.

$$G15 = F + G$$

$$G14 = E + K$$

$$G13 = H + I$$

$$G12 = G15 + A$$

$$\begin{aligned}
 &= G15 + A \\
 &= F + G + A \\
 G11 &= A + B \\
 G10 &= L + M \\
 G9 &= G \cdot G14 \\
 &= G \cdot (E + K) \\
 &= GE + GK \\
 G8 &= J + H \\
 G7 &= G12 + F + G13 \\
 &= F + G + A + H + I \\
 G6 &= D + E \\
 G5 &= G11 + C \\
 &= A + B + C \\
 G4 &= G9 + G10 \\
 &= GE + GK + L + M \\
 G3 &= G7 + G8 \\
 &= F + G + A + F + H + I + J + H \\
 G2 &= G5 \cdot G6 \\
 &= (A + B + C) \cdot (D + E) \\
 &= AD + AE + BD + BE + CD + CE \\
 G1 &= G2 \cdot G3 \cdot G4 \\
 &= (AD + AE + BD + BE + CD + CE) \cdot (F + G + A + H + I + J + H) \cdot (GE + GK + L + M) \\
 &= ADL + ADM + AEG + AEL + AEM + BEG + CEG + ADGK + BDGK + BDGL + BDGM + BDFL + \\
 &\quad BDFM + BDHL + BDHM + BDIL + BDIM + BDJL + BDJM + BEFL + BEFM + BEHK + BEHM + BEIL + \\
 &\quad BEIM + BEJL + BEJM + CDGK + CDGL + CDGM + CDFL + CDFM + CDHL + CDHM + CDIL + \\
 &\quad CDIM + CDJL + CDJM + CEFL + CEFM + CEHL + CEHM + CEIL + CEIM + CEJL + CEJM
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisis *minimal cut set* di atas, diperoleh sebanyak 48 kombinasi *basic cause* yang dapat menyebabkan terjadinya *top event*. Identifikasi kombinasi penyebab ini penting untuk memahami pola kejadian yang dapat mewujudkan terjadinya *top event*. Seluruh kombinasi *basic cause* tersebut disusun secara sistematis dan disajikan pada Tabel 4 dibawah ini.

Tabel 4. Hasil dan Keterangan *Minimal Cut Set*

No	Minimal Cut Set	Keterangan
1	A, D, dan L	Jadwal inspeksi tidak teratur, <i>lifetime pressure transmitter</i> , isolasi kabel rusak
2	A, D, dan M	Jadwal inspeksi tidak teratur, <i>lifetime pressure transmitter</i> , kabel tidak sesuai standar
3	A, E, dan G	Jadwal inspeksi tidak teratur, kurangnya perawatan, aliran gas proses tinggi
4	A, E, dan L	Jadwal inspeksi tidak teratur, kurangnya perawatan, isolasi kabel rusak
5	A, E, dan M	Jadwal inspeksi tidak teratur, kurangnya perawatan, kabel tidak sesuai standar
6	B, E, dan G	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, aliran gas proses tinggi
7	C, E, dan G	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan, aliran gas proses tinggi
8	A, D, G, dan K	Jadwal inspeksi tidak teratur, <i>lifetime pressure transmitter</i> , aliran gas proses tinggi, tidak dilakukan monitoring
9	B, D, G, dan K	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , aliran gas proses tinggi, tidak dilakukan monitoring
10	B, D, G, dan L	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , aliran gas proses tinggi, isolasi kabel rusak
11	B, D, G, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , aliran gas proses tinggi, kabel tidak sesuai standar

Tabel 4. Hasil dan Keterangan *Minimal Cut Set* (Lanjutan)

No	Minimal Cut Set	Keterangan
12	B, D, F, dan L	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , material tidak sesuai spesifikasi, isolasi kabel rusak

13	B, D, F, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , material tidak sesuai spesifikasi, kabel tidak sesuai standar
14	B, D, H, dan L	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> .(PT-220), tidak sesuai SOP, isolasi kabel rusak
15	B, D, H, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , tidak sesuai SOP, kabel tidak sesuai standar
16	B, D, I, dan L	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , kurangnya perawatan, isolasi kabel rusak
17	B, D, I, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , kurangnya perawatan, kabel tidak sesuai standar
18	B, D, J, dan L	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , pasokan nitrogen habis, isolasi kabel rusak
19	B, D, J, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, <i>lifetime pressure transmitter</i> , pasokan nitrogen habis, kabel tidak sesuai standar
20	B, E, F, dan L	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, material tidak sesuai spesifikasi, isolasi kabel rusak
21	B, E, F, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, material tidak sesuai spesifikasi, kabel tidak sesuai standar
22	B, E, H, dan K	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, tidak sesuai SOP, tidak dilakukan monitoring
23	B, E, H, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, tidak sesuai SOP, kabel tidak sesuai standar
24	B, E, I, dan L	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, kurangnya pengawasan, isolasi kabel rusak
25	B, E, I, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, kurangnya pengawasan, kabel tidak sesuai standar
26	B, E, J, dan L	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, pasokan nitrogen habis, isolasi kabel rusak
27	B, E, J, dan M	<i>Lifetime</i> pada katalis, kurangnya perawatan, pasokan nitrogen habis, kabel tidak sesuai standar
28	C, D, G, dan K	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , aliran gas proses tinggi, tidak dilakukan monitoring
29	C, D, G, dan L	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , aliran gas proses tinggi, isolasi kabel rusak
30	C, D, G, dan M	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , aliran gas proses tinggi, kabel tidak sesuai standar
31	C, D, F, dan L	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , material tidak sesuai spesifikasi, isolasi kabel rusak
32	C, D, F, dan M	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , material tidak sesuai spesifikasi, kabel tidak sesuai standar
33	C, D, H, dan L	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , tidak sesuai SOP, isolasi kabel rusak
34	C, D, H, dan M	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , tidak sesuai SOP, kabel tidak sesuai standar
35	C, D, I, dan L	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , kurangnya pengawasan, isolasi kabel rusak
36	C, D, I, dan M	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , kurangnya pengawasan, kabel tidak sesuai standar
37	C, D, J, dan L	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , pasokan nitrogen habis, isolasi kabel rusak
38	C, D, J, dan M	Gas proses terkontaminasi, <i>lifetime pressure transmitter</i> , pasokan nitrogen habis, kabel tidak sesuai standar
39	C, E, F, dan L	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan, material tidak sesuai spesifikasi, isolasi kabel rusak
40	C, E, F, dan M	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan, material tidak sesuai spesifikasi, kabel tidak sesuai standar
41	C, E, H, dan L	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan, tidak sesuai SOP, isolasi kabel rusak
42	C, E, H, dan M	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan, tidak sesuai SOP, kabel tidak sesuai standar

Tabel 4. Hasil dan Keterangan *Minimal Cut Set* (Lanjutan)

43	C, E, I, dan L	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan, kurangnya pengawasan, isolasi kabel rusak
44	C, E, I, dan M	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan,

		kurangnya pengawasan, kabel tidak sesuai standar
45	C, E, J, dan L	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan, pasokan nitrogen habis, isolasi kabel rusak
46	C, E, J, dan M	Gas proses terkontaminasi, kurangnya perawatan, pasokan nitrogen habis, kabel tidak sesuai standar

Berdasarkan Tabel 4 didapatkan hasil dari perhitungan *minimal cut set* sebanyak 46 *set* yang mewakili potensi terjadinya *top event*, yaitu ledakan pada *reformer*. Dari jumlah tersebut, terdapat 7 *minimal cut set* yang memiliki order 3 dan 39 *minimal cut set* lainnya yang memiliki order 4. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar kejadian puncak (*top event*) tidak hanya dipicu oleh satu atau dua penyebab, akan tetapi hasil dari kombinasi beberapa penyebab. Maka dari itu, untuk meminimalkan kemungkinan terjadinya *top event*, pada setiap *basic cause* dapat diberikan saran atau rekomendasi pengendalian yang dibutuhkan. Berikut daftar rekomendasi berdasarkan *basic cause* yang telah dianalisa dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekomendasi Berdasarkan *Basic Cause*

Kode	<i>Basic Cause</i>	Rekomendasi
A	Jadwal inspeksi tidak teratur	- Menyusun dan menerapkan jadwal inspeksi berkala - Mengadakan sosialisasi untuk operator dan teknisi terkait pentingnya kepatuhan jadwal inspeksi
B	<i>Lifetime</i> pada katalis	- Mengganti katalis sesuai dengan standar spesifikasi yang berlaku - Melakukan inspeksi dan perawatan pada katalis
C	Gas proses terkontaminasi	- Memastikan bahan baku gas bebas sesuai dengan standar kemurnian - Melakukan analisa kualitas gas proses secara rutin
D	<i>Lifetime</i> pada <i>pressure transmitter</i>	- Mengganti <i>pressure transmitter</i> sesuai dengan standar spesifikasi yang berlaku - Melakukan perawatan pada <i>pressure transmitter</i>
E	Kurangnya perawatan	- Menerapkan program <i>preventif</i> dan <i>predictive maintenance</i> pada peralatan dan komponen - Mengadakan pelatihan yang berkaitan dengan penerapan prosedur ataupun instruksi <i>maintenance</i>
F	Material tidak sesuai spesifikasi	- Mengganti material sesuai dengan spesifikasi standar yang berlaku - Melakukan pemeriksaan pada material sesuai dengan jenis dan standarnya
G	Aliran gas proses tinggi	- Menambah <i>flow control valve</i> yang terintegrasi dengan sistem alarm - Melakukan monitoring secara berkala oleh operator
H	Tidak sesuai SOP	- Melakukan pelatihan dan <i>refreshment</i> SOP pekerjaan - Memastikan <i>permit to work</i> sudah sesuai dan disetujui
I	Kurangnya pengawasan	- Melakukan penambahan personel pengawas - Melakukan pemeriksaan hasil akhir pekerjaan
J	Pasokan nitrogen habis	- Melakukan monitoring pada cadangan nitrogen - Melakukan penjadwalan pengisian ulang nitrogen
K	Tidak dilakukan monitoring	- Melakukan penerapan prosedur yang jelas bagi operator - Melakukan koordinasi tim operator pada setiap <i>shift</i>
L	Isolasi kabel rusak	- Melakukan inspeksi pada kabel instrumentasi - Melakukan penggantian kabel jika ditemukan adanya indikasi kerusakan
M	Kabel tidak sesuai standar	- Mengganti kabel instrumentasi sesuai dengan standar yang berlaku - Melakukan pemeriksaan kualitas pada kabel instrumentasi yang digunakan

Berdasarkan Tabel 5, maka pengendalian yang direkomendasikan meliputi upaya pada tiga tingkatan hierarki pengendalian, yaitu substitusi, rekayasa teknik, dan kontrol administrasi. Sebagai contoh, pada tingkat substitusi, pengendalian dilakukan dengan mengganti material dan komponen sesuai dengan spesifikasi. Pada rekayasa teknik, melakukan penambahan *flow control valve* yang terintegrasi dengan sistem alarm. Sementara itu, pada kontrol administrasi, perusahaan perlu menetapkan jadwal inspeksi dan pemeliharaan berkala, meningkatkan pengawasan serta memastikan kepatuhan terhadap prosedur operasi standar (SOP) melalui pengadaan pelatihan dan evaluasi berkala.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis akar penyebab ledakan pada *reformer* dengan menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) didapatkan 46 *minimal cut set* dengan 13 *basic cause* yaitu jadwal inspeksi tidak teratur, *lifetime* pada katalis, gas proses terkontaminasi, *lifetime* pada *pressure transmitter*, kurangnya perawatan, material tidak sesuai spesifikasi, aliran gas proses tinggi, tidak sesuai SOP, kurangnya pengawasan, pasokan nitrogen habis, tidak dilakukan monitoring, isolasi kabel rusak, dan kabel tidak sesuai standar. Hasil analisis dengan metode FTA kemudian diberikan rekomendasi pengendalian pada setiap *basic cause* berdasarkan hierarki pengendalian yaitu pada tingkat substitusi mengganti material dan komponen sesuai dengan spesifikasi, pada tingkat rekayasa teknik menambah *flow control valve*, dan pada tingkat kontrol administrasi dengan menetapkan jadwal inspeksi ataupun perawatan, kepatuhan SOP, dan pengadaan pelatihan.

DAFTAR PUSTAKA

- Analysa, D., & Rahma, P. D. (2019). *Evaluasi Keterlambatan Proyek Pembangunan Graha Mojokerto Service City (GMSC) dengan Metode Fault Tree Analysis (FTA)*. 4(2), 112–119.
- Buyukkidan, B., Gumus, H., & Uslu, O. A. (2021). *The Risk Calculation of Hazardous Zones Created By Flammable And Explosive Chemicals , LPG Tank Example The Risk Calculation of Hazardous Zones Created by Flammable and Explosive Chemicals , LPG Tank Example*. 2(2), 47–62. <https://doi.org/10.52114/apjhad.1024396>
- Dahlan, A., Leksono, E. B., & Fathoni, M. Z. (2021). IDENTIFIKASI DAN ANALISIS RISIKO OPERASIONAL PADA DIVISI PRODUKSI PERUSAHAAN VULKANISIR BAN MENGGUNAKAN METODE RISK MANAGEMENT DENGAN PENDEKATAN FMEA DAN FTA. *JUSTI (Jurnal Sistem Dan Teknik Industri)*, 2(1), 44. <https://doi.org/10.30587/justicb.v2i1.3183>
- Duyo, R. A. (2020). ANALISIS PENYEBAB GANGGUAN JARINGAN PADA DISTRIBUSI LISTRIK MENGGUNAKAN METODE FAULT TREE ANALYSIS DI PT . PLN (PERSERO) RAYON DAYA MAKASSAR. *Vertex Elektro*, 12(2), 1–12.
- Ericson, C. A. (2005). Hazard Analysis Techniques for System Safety. In *John Wiley & Sons, Inc*. <https://doi.org/10.1002/0471739421>
- Fauzia, Q., Lestari, F., & Wardani, D. P. (2022). *ANALYSIS OF FIRE RISK ASSESSMENT IN SOUTH JAKARTA 2021 Received : January 24 , 2022 Introduction In general , based on data from the US Fire Administration statistics during the period of*. 13(1), 26–38.
- Hardiansah, Sukmono, Y., & Saptaningtyas, W. W. (2023). Analisis Risiko Kecelakaan Kerja Dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA). *JATRI (Jurnal Teknik Industri)*, 1(1), 1–9.
- Hasan, M. S., & Widayat, W. (2022). Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(1), 38–48. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13374>
- Juhindra, M. H., & Nugraheni, F. (2023). *IDENTIFIKASI RISIKO / BAHAYA DENGAN MENGGUNAKAN METODE FAULT TREE ANALYSIS PADA PEKERJAAN*. 2(2).
- Parapat, R. Y., Almira, K., Fadillah, R., & Novianti, R. S. (2025). Risk Assessment of the Primary Reformer in the Ammonia Unit at Fertilizer Industry Using the HAZOP Method. *Integrative Perspectives of Social and Science Journal (IPSSJ)*, 2(3), 3104–3112.
- Perdana, M. R., Suroso, H. C., & Raharjo, R. O. (2024). ANALISIS RISIKO KECELAKAAN KERJA DENGAN METODE FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS DAN FAULT TREE ANALYSIS UNTUK MENGURANGI TINGKAT RESIKO KECELAKAAN KERJA PADA EFFLUENT TREATMENT. *Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan IV*, 1–7.
- Salsabila, G. J., Santoso, M. Y., & Dhani, M. R. (2021). Fault Tree Analysis dan Pengendalian Bahaya pada Kegagalan Komponen Furnace dan Heat Exchanger di PPSDM Migas. *5th Proceeding Conference On Safety Engineering*, 28–32.
- Suryaningrum, A., Rudianto, H., Mahmudi, A., & Prasetyo, E. (2024). *Analisis Faktor Penyebab Keterlambatan Menggunakan Metode Fault Tree Analysis (Studi Kasus Pembangunan Office Headquarter Surabaya)*. 2(1), 18–29. <https://doi.org/10.54732/i.v2i1.1104>
- Syarifudin, A., & Putra, J. T. (2021). *ANALISA RISIKO KEGAGALAN KOMPONEN PADA EXCAVATOR KOMATSU 150LC DENGAN METODE FTA DAN FMEA DI PT. XY*. 4(2), 1–10.
- Tarigan, K., Barus, A., & Sihombing, J. (2024). Estimation of Hydrogen Requirements in the Process Hydrogenation in Plant 2#200 PT. XYZ. *Jurnal Rekayasa, Teknologi Proses Dan Sains Kimia*, 3(1), 18–30.
- Wasahua, S., Rikumahu, J. ., & Katanja, A. . (2021). ANALISA PENYEBAB GANGGUAN JARINGAN (FAULT TREE ANALISYS). *Jurnal ELKO (Elektrikal Dan Komputer)*, 2(2). <https://doi.org/10.54463/je.v2i2.49>