

Identifikasi Bahaya Tekanan dan Suhu pada Proses Hidrogenasi di Industri Minyak Kelapa Sawit dengan Pendekatan *Hazard and Operability Study* dan *Fault Tree Analysis*

Hendy Juni ArRasyid¹, Agung Nugroho^{2*} dan Mey Rohma Dhani³

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

*E-mail: hendydewa165@gmail.com¹, agung_nugroho@ppns.ac.id², meyrohmadhani@ppns.ac.id³

Abstrak

Abstrak— Penelitian ini difokuskan pada industri pengolahan minyak kelapa sawit yang dalam operasionalnya kerap menggunakan proses hidrogenasi untuk meningkatkan kestabilan dan karakteristik kimia minyak. Unit hidrogenasi merupakan satu-satunya fasilitas yang memproduksi lemak padat (*hardened fat*) dan terintegrasi dengan unit-unit lain dalam sistem produksi. Proses hidrogenasi memiliki potensi bahaya tinggi, terutama risiko ledakan yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti kebocoran gas hidrogen, tekanan dan suhu tinggi, serta kondisi operasional lainnya. Risiko-risiko ini dapat menimbulkan kerusakan serius terhadap fasilitas produksi. Saat ini, industri telah menerapkan metode Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko (IBPR) melalui pendekatan *Hazard Identification and Determining Control* (HIRADC). Namun, metode tersebut dinilai kurang efektif karena belum mampu memberikan hasil yang menyeluruh dan terstruktur, khususnya dalam aspek operabilitas dan keselamatan proses. Terlebih lagi, tingkat risiko pada unit hidrogenasi tergolong lebih tinggi dibandingkan unit lainnya. Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan pendekatan yang lebih mendalam untuk mencegah potensi kecelakaan atau kegagalan dalam proses produksi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi bahaya pada unit hidrogenasi menggunakan metode *Hazard and Operability Study* (HAZOP). Selanjutnya, untuk mengetahui akar penyebab dari risiko tinggi yang teridentifikasi, dilakukan analisis lanjutan menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) guna menentukan tindakan pengendalian yang tepat.

Kata Kunci: Hidrogenasi, Hazard and Operability (HAZOP), Fault Tree Analysis (FTA)

Abstract

Abstract— This research focuses on the palm oil processing industry which in its operations often uses the hydrogenation process to improve the stability and chemical characteristics of the oil. The hydrogenation unit is the only facility that produces hardened fat and is integrated with other units in the production system. The hydrogenation process has high potential hazards, especially the risk of explosion caused by factors such as hydrogen gas leakage, high pressure and temperature, and other operational conditions. These risks can cause serious damage to production facilities. Currently, the industry has implemented the Hazard Identification and Risk Assessment (HIA) method through the Hazard Identification and Determining Control (HIRADC) approach. However, this method is considered less effective because it has not been able to provide comprehensive and structured results, especially in terms of process operability and safety. Moreover, the risk level in the hydrogenation unit is relatively higher than other units. Based on these conditions, a more in-depth approach is needed to prevent potential accidents or failures in the production process. Therefore, this study aims to identify potential hazards in the hydrogenation unit using the Hazard and Operability Study (HAZOP) method. Furthermore, to determine the root cause of the identified high risk, further analysis was carried out using the Fault Tree Analysis (FTA) method to determine appropriate control measures.

Keywords: Hidrogenasi, Hazard and Operability (HAZOP), Fault Tree Analysis (FTA)

1. PENDAHULUAN

Industri pengolahan minyak kelapa sawit memainkan peran penting dalam mendukung perekonomian Indonesia. Pada tahun 2022, konsumsi minyak kelapa sawit di dalam negeri mengalami peningkatan sebesar 10,36% dibandingkan tahun sebelumnya, mencapai sekitar 17,5 juta ton, atau meningkat sekitar 1,643 juta ton dari angka tahun 2021 sebesar 15,857 juta ton (Anjani et al., 2022). Pertumbuhan pesat ini mendorong perusahaan untuk terus meningkatkan kapasitas produksi, yang pada akhirnya menuntut pekerja untuk memenuhi target

operasional yang tinggi. Berdasarkan standar Process Safety Management (PSM) dari OSHA 3132 (2000), setiap perusahaan yang mengelola bahan kimia berbahaya wajib melakukan analisis potensi bahaya sejak tahap awal proses guna mencegah kecelakaan kerja. Salah satu industri pengolahan kelapa sawit di Surabaya dikenal sebagai produsen utama Harden Pump Oil Stearine (HPOS) dan Harden Pump Stearine (HPST), serta memiliki beberapa unit produksi seperti Refinery Plant, Fractination Plant, Margarine Plant, dan Hydrogenation Plant.

Di antara unit tersebut, Hydrogenation Plant menjadi satu-satunya bagian yang secara khusus bertugas memproduksi HPOS dan HPST. Proses produksinya terbagi menjadi dua tahapan utama, yaitu Unit Reactor dan Unit Filtrasi, yang beroperasi secara terintegrasi dengan unit lain dalam sistem produksi. Proses dimulai di Unit Reactor, tempat berlangsungnya reaksi antara minyak bahan baku dan gas hidrogen (H_2) pada suhu antara $150^\circ C$ hingga $155^\circ C$ untuk mencapai nilai iodine (iodine value/IV) yang ditentukan. Reaksi ini berlangsung melalui beberapa komponen penting, termasuk Catalyst Feed Tank, Reactor, Loop Pipe Work, Loop Heat Exchanger, dan Condensate Tank, sebelum dilanjutkan ke Unit Filtrasi untuk menghasilkan produk akhir.

Namun, sifat kimia dari bahan baku, peralatan, serta proses dalam Unit Reactor memiliki potensi bahaya, seperti kebocoran gas hidrogen dan akumulasi listrik statis yang dapat memicu ledakan. Berdasarkan informasi dari Material Safety Data Sheet (MSDS), hidrogen diklasifikasikan sebagai zat kimia berbahaya, baik dalam bentuk gas maupun cair. Gas ini memiliki rentang batas nyala di udara antara 4% hingga 75%, serta energi minimum untuk memicu ledakan hanya sebesar 0,02 mega joule (MJ). Selain mudah terbakar akibat percikan listrik statis, gas hidrogen juga bersifat tidak berwarna, tidak berbau, dan dapat merusak beberapa jenis logam tertentu. Unit Filtrasi berperan sebagai tahap lanjutan dari Unit Reactor, di mana proses penyaringan dilakukan untuk memisahkan katalis yang digunakan selama reaksi dari produk akhir atau campuran reaksi yang terbentuk.

Plant Hydrogenation telah menerapkan metode Identifikasi Potensi Bahaya dan Penilaian Risiko (IBPR) melalui pendekatan Hazard Identification Risk Assessment and Determining Control (HIRADC). HIRADC merupakan suatu metode untuk mengidentifikasi bahaya yang mungkin timbul dari aktivitas rutin perusahaan, dengan tujuan mencegah dan meminimalkan kecelakaan kerja serta mengendalikan risiko selama proses perbaikan dan perawatan agar operasional berjalan dengan aman. Namun, penerapan metode HIRADC dinilai kurang efektif karena belum mampu memberikan analisis yang detail dan terstruktur, khususnya dalam hal operabilitas dan keselamatan proses. Hal ini menjadi perhatian serius mengingat tingkat risiko di Plant Hydrogenation lebih tinggi dibandingkan unit lain. Proses produksi di plant ini melibatkan pencampuran bahan kimia seperti gas hidrogen (H_2), katalis, dan bahan baku, yang memerlukan pendekatan pengendalian risiko yang lebih komprehensif.

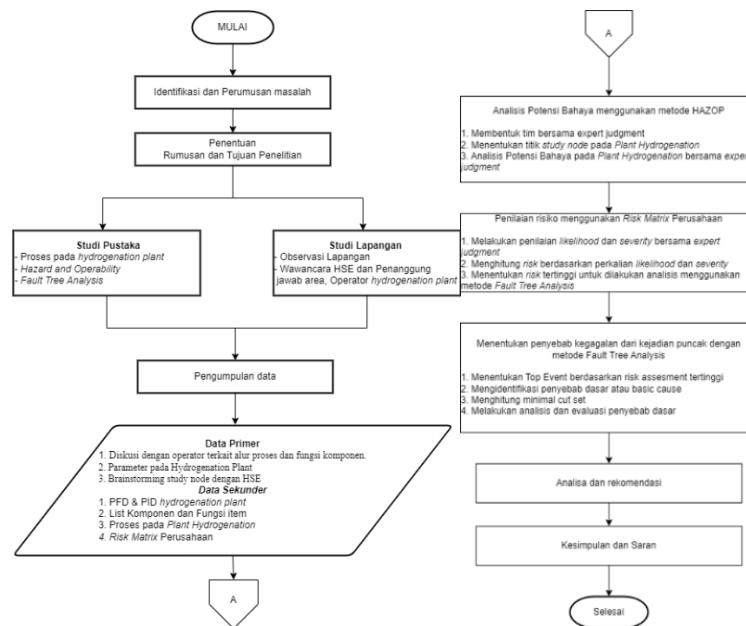
Menurut penelitian yang dilakukan oleh Molkov et al. (2021), simulasi ledakan tangki hidrogen dalam kondisi kebakaran di ruang terbuka menunjukkan bahwa tekanan gelombang kejut awal meningkat secara signifikan pada jarak 0,5 meter dari titik ledakan. Namun, gelombang kejut tersebut mulai menghilang di area yang lebih jauh, yakni pada jarak lebih dari 5 meter. Penelitian ini juga mengungkapkan bahwa sensor tekanan ketiga mendeteksi tekanan gelombang awal yang lebih tinggi, namun tekanan tersebut cenderung menurun lebih cepat di area dekat, khususnya pada arah yang tegak lurus terhadap sumbu tangki. Temuan ini menjadi dasar perlunya identifikasi bahaya pada Plant Hydrogenation, khususnya dalam pelaksanaan pekerjaan panas di area tersebut yang mensyaratkan jarak aman minimal 6 meter dari sumber potensi bahaya. Oleh karena itu, dibutuhkan langkah preventif untuk mencegah terjadinya kecelakaan maupun kegagalan proses produksi.

Dalam penelitian ini, metode *Hazard and Operability* (HAZOP) digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya yang mungkin terjadi. HAZOP merupakan metode yang dirancang untuk mendeteksi potensi masalah operabilitas dalam suatu sistem, serta mengidentifikasi penyebab terjadinya hambatan operasional atau penyimpangan proses yang dapat mempengaruhi kualitas produk (*Hazard and Operability Studies (HAZOP Studies): Application Guide*, 2016). Metode ini secara sistematis meninjau proses atau operasi dalam plant hydrogenation guna mengidentifikasi potensi penyimpangan yang berpotensi menimbulkan kecelakaan (Nur, 2018). Proses identifikasi mencakup analisis terhadap kemungkinan penyimpangan dari kondisi operasi normal, penelusuran faktor penyebabnya, penilaian konsekuensi negatif yang dapat ditimbulkan, serta pemberian rekomendasi pengendalian untuk meminimalkan risiko yang telah teridentifikasi.

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi dan menilai potensi bahaya pada *Hydrogenation Plant* di industri pengolahan minyak kelapa sawit dengan menggunakan metode *Hazard and Operability* (HAZOP) dan *Fault Tree Analysis* (FTA). HAZOP digunakan untuk mendeteksi penyimpangan operasional dan potensi risiko, yang kemudian diklasifikasikan berdasarkan tingkat keparahannya untuk memudahkan penentuan prioritas pemeliharaan. Risiko yang masih tinggi dianalisis lebih lanjut menggunakan FTA untuk menelusuri akar penyebab kegagalan, mulai dari kejadian puncak hingga penyebab dasar, sehingga dapat dirumuskan langkah pengendalian yang efektif. Pendekatan ini juga mempertimbangkan bahaya dari deviasi seperti *no flow*, *more flow*, dan *less flow*, yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan, gangguan reaksi, serta penurunan kualitas produk. Hasil dari analisis ini menjadi dasar rekomendasi pengendalian risiko berdasarkan hierarki pengendalian.

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini yaitu berupa alur atau kerangka kerja yang terstruktur dan sistematis. Sehingga terdapat tahap-tahap suatu proses yang terkait satu sama lainnya. Kemudian dilakukan kerangka pikir yang sistematis untuk menghasilkan hasil penelitian yang lebih komprehensif. Adapun tahapan yang digunakan meliputi, identifikasi masalah, pengumpulan data, pengolahan data, analisis, kesimpulan dan saran. Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini berupa *Hazard and Operability* (HAZOPS) yang kemudian di analisis tambahan menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA). Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data primer dan sekunder. Pada data primer didapatkan dari hasil diskusi dengan operator yang menangani proses *Hydrogenation plat*, parameter komponen, dan *brainstorming studey node* dengan HSE. Sedangkan data sekunder berupa data komponen dan fungsinya dari *Unit Reactor* dan *Unit Filtrasi*, P&ID dan sistem kerja *hydrogenation plant*, data standart *severity* dan *likelihood* perusahaan, serta data-data lain penunjang penelitian Berikut ini Gambar 1. Mengenai diagram alir penelitian.

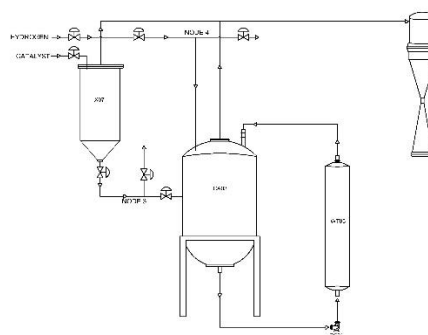


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Plant Hydrogenation

Identifikasi bahaya pada Digestion Unit dengan menggunakan HAZOPS, diawali dengan menentukan Study node. Study node dibuat untuk mempermudah dalam mengerjakan HAZOPS dikarenakan Digestion Unit dipecah menjadi beberapa aliran proses yang lebih kecil. Study node mengacu pada PFD dan PID Digestion Unit ditentukan bersama tim HAZOPS. Penentuan study node akan mempermudah identifikasi serta menemukan semua penyimpangan yang berpotensi menimbulkan kecelakaan atau kegagalan. Berikut merupakan gambar study node yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram PFD Hydrogenation

3.2 Identifikasi Bahaya Menggunakan Metode *Hazard and Operability* (HAZOP)

Identifikasi bahaya bertujuan untuk mengenali dan memperkirakan potensi bahaya yang mungkin timbul dalam suatu sistem, baik itu terkait dengan peralatan, lingkungan kerja, prosedur, maupun proses operasional. Untuk melakukan identifikasi tersebut secara efektif, diperlukan metode yang sesuai dengan objek serta tujuan dari proses identifikasi. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah *Hazard and Operability* (HAZOP), yang dinilai tepat untuk mengidentifikasi potensi bahaya secara sistematis dan terstruktur pada industri proses. Metode ini berfokus pada titik studi tertentu dengan tujuan menelaah setiap bagian dari proses menggunakan kata kunci (*guide words*) dan parameter yang dapat membantu dalam mendeteksi penyimpangan dari kondisi normal. Untuk mendukung proses identifikasi dalam penelitian ini, digunakan *Process Flow Diagram* (PFD) dan *Piping & Instrument Diagram* (P&ID) dari *Plant Hydrogenation*. Unit ini merupakan satu-satunya bagian dalam industri pengolahan minyak kelapa sawit yang memproduksi *Harden Pump Oil Stearine* (HPOS) dan *Harden Pump Stearine* (HPST). *Plant Hydrogenation* berfungsi sebagai unit reaksi yang terdiri dari beberapa tahapan proses, dan melibatkan lima komponen utama, yaitu *Catalyst Feed Tank*, *Reactor*, *Loop Pipe Work*, *Loop Heat Exchanger*, serta *Condensate Tank*, yang semuanya berperan dalam menghasilkan produk akhir.

3.2.1 Penentuan *Study Node*

Tahap awal pengerjaan metode HAZOPS berupa analisis *study node* dari *Plant Hydrogenation*. Berdasarkan analisis penelitian ini dimulai dari *transfer raw material* hingga ke proses *filtration*. Adapun kondisi operasional *Hydrogenation plant* sebagai berikut.

Tabel 1. Kondisi Operasional *Hydrogenation plant*

No	Titik Studi	Komponen	Kondisi Operasi
1	Node 4	Hydrogen	Pressure rate: 4 bar Temp: 150°C - 155°C
		Heatexchanger	

3.2.2 Pengerjaan Dokumen HAZOP

Setelah penentuan *study node* kemudian dilakukan pengerjaan dokumen HAZOPS dengan menentukan parameter untuk mempermudah identifikasi. Adapun hasil dari analisis parameter yang digunakan meliputi.

Tabel 2. Parameter pada HAZOP

No	Parameter
1	Temperature
2	Pressure

Setelah menentukan parameter yang dapat dilihat pada Tabel tahap selanjutnya adalah menentukan *guidewords*. Berikut merupakan *guidewords* yang digunakan pada penelitian ini :

Tabel 3. *Guide word* pada HAZOP

<i>Guide Word</i>	Deskripsi
<i>Less</i>	Penurunan kuantitatif dalam tujuan desain terjadi (mis., Tekanan /Kurang)
<i>High</i>	Proses atau sistem beroperasi pada tekanan, suhu, atau laju aliran yang lebih tinggi dari biasanya

Setelah menentukan parameter dan *guidewords*, dilakukan pengerjaan dokumen HAZOP dengan melakukan proses identifikasi dengan tim HAZOP.

Tabel 4. *Worksheet* HAZOP

No	Parameter	Guide Word	Deviation	Possible Cause	Consequences	Safeguard	L	S	Risk	Action Required
1	Pressure	High	Tekanan gas H ₂ masuk terlalu tinggi	<ul style="list-style-type: none"> - Terjadinya eror pada sistem manifold gas - Seal tape pada manifold gas rusak - Pressure valve (PV 8010) gagal mengirim sinyal ke Pressure Indicator Control (PIC 0301) 	<ul style="list-style-type: none"> - Terjadinya kegagalan dalam proses reaksi pada tangki (CA 03) - Akan menyebabkan kerusakan pada - Flow pada gas H₂ mengalir terlalu cepat - Terjadinya kebocoran pada pipa gas H₂ (104-50-CS1) - Kerugian bahan baku - Berpotensi menyebabkan ledakan ketika gas H₂ bocor dan bercampur dengan udara 	<ul style="list-style-type: none"> - Pressure indicator (PI 8001) - Pressure Indicator Control (PIC 0301) - Pressure Valve (PV 8010) 	2	5	10	<ul style="list-style-type: none"> - Melakukan penjadwalan kalibrasi pada pressure indicator (PI 8051) agar dapat dilakukan secara rutin - Penjadwalan pembersihan saluran secara rutin agar tidak menyebabkan kebutuhan - Melakukan jadwal kalibrasi pada Pressure Valve (PV 8010) agar dilakukan secara rutin
		Less	Pressure Valve PV (8010) tidak terbuka dengan sempurna	<ul style="list-style-type: none"> - Terdapat kerusakan pada pressure indicator (PI 8001) - Terdapat penghalang atau penyumbatan 	<ul style="list-style-type: none"> - Flow pada gas H₂ mengalir sedikit dan lambat - Terjadinya kegagalan dalam proses reaksi - Kerugian bahan baku 		1	4	4	<ul style="list-style-type: none"> - Melakukan penjadwalan kalibrasi agar dilakukan secara rutin - Penjadwalan pembersihan saluran secara rutin agar tidak menyebabkan kebuntuan
2	Temperature	High	Suhu Oil RBDPO terlalu tinggi	<ul style="list-style-type: none"> - Terjadinya error/rusak pada temperature indicator (TI 8001) - Terjadinya kerusakan pompa sirkulasi (PC 04) 	<ul style="list-style-type: none"> - Terjadinya kegagalan dalam proses reaksi - Terjadinya kerusakan pada komponen - Berpotensi menyebabkan kerusakan pada dinding komponen 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperature Indicator (TI 8001) 	3	3	9	<ul style="list-style-type: none"> - Memeriksa hasil kualitas Iodine Value - Melakukan monitoring suhu Oil RBDPO
		Low	Suhu Oil RBDPO terlalu rendah	<ul style="list-style-type: none"> - Terjadinya error/rusak pada temperature indicator (TI 8001) 	<ul style="list-style-type: none"> - Terjadinya kegagalan dalam proses reaksi - Kerugian bahan baku 		1	3	3	<ul style="list-style-type: none"> - Memeriksa hasil kualitas Iodine Value - Melakukan monitoring suhu Oil RBDPO

3.3 Analisis Hasil Identifikasi HAZOP

Pada identifikasi HAZOP terdapat penyimpangan yang berbeda beda setiap nodenya. Namun pada

penelitian ini hanya membahas Node 4 (*Hydrogen to Heatexchanger*). Berdasarkan hasil identifikasi menggunakan metode HAZOP, ditemukan bahwa pada node 4 terdapat empat jenis penyimpangan dengan tingkat risiko yang bervariasi, sebagaimana dijelaskan dalam Lampiran. Dari keempat penyimpangan tersebut, dua dikategorikan sebagai risiko rendah, satu sebagai risiko sedang, dan satu sebagai risiko tinggi. Salah satu potensi penyimpangan yang teridentifikasi pada node 4 adalah tekanan berlebih (*High Pressure*), yang dapat dipicu oleh kegagalan pada seal tape dan sistem manifold gas. Kondisi ini memungkinkan aliran gas hidrogen (H_2) menuju reaktor menjadi terlalu cepat, sehingga meningkatkan risiko kebocoran gas yang berpotensi menimbulkan ledakan. Tingkat keparahan akibat tekanan tinggi ini dinilai sebesar 10 (kategori tinggi), dengan kemungkinan kejadian sebesar 2 (jarang), dan keparahan akibat fatal sebesar 5 (*fatality*). Oleh karena itu, risiko ini termasuk dalam kategori tinggi. Untuk mengantisipasi kejadian tersebut, sistem dilengkapi dengan alat pengaman berupa pressure indikator. Sebagai langkah mitigasi tambahan, disarankan untuk melakukan kalibrasi alat ukur secara berkala, minimal sekali setiap tahun atau maksimal dua tahun, sebagaimana diusulkan oleh Syaiful et al. (n.d.).

3.4 Analisis Kategori Risiko

Berdasarkan hasil pengerjaan HAZOP dapat dikategorikan jenis risiko yang terjadi sesuai dengan Node 4 seperti hasil berikut ini.

Tabel 5. Kategori Risiko tidak dapat diterima dalam metode HAZOP

Node	Parameter	Guide Word	Deviation	Risk	Kategori Risiko
4	Pressure	High	Seal tape pada <i>manifold</i> gas rusak	10	Tidak dapat diterima
	Temperature	High	Suhu pada tangki reaktor terlalu tinggi	9	Tidak dapat diterima

Pada hasil identifikasi terdapat parameter yang tidak dapat diterima mengenai tekanan tinggi pada seal tape di manifold gas yang rusak. Sehingga diperlukan rekomendasi untuk merunkan risiko menjadi dapat diterima dengan menggunakan hirarki pengenalan.

3.5 Rekomendasi

Dari hasil penilaian kategori risiko terdapat parameter yang perlu diberikan rekomendasi agar dapat menurunkan risiko menjadi dapat diterima. Adapun hasil analisis rekomendasi yang didapatkan sebagai berikut.

Tabel 6. Rekomendasi Berdasarkan Hirarki Pengendalian

Parameter (<i>Pressure</i>)	Parameter (<i>Temperature</i>)
Eliminasi : tidak ada Substitusi : tidak ada Rekayasa Teknik: - Melakukan inovasi pada komponen pipa baja karbon dengan komponen pipa yang memiliki sifat anti korosif yang lebih baik yaitu stainless steel tipe 316. Hal ini disebabkan karena unsur logam nikel dan krom yang terkandung dalam <i>stainless steel</i> memiliki kandungan nikel 10% dan kromium 16%. Maka dari itu, stainless steel 316 banyak digunakan pada pipa, komponen mesin, peralatan petrokimia, dan peralatan industri lainnya. (Syaiful et al., n.d.) - Melakukan pengendalian yang dapat dilakukan dengan penambahan <i>Safety Instrumented System</i> berupa transmitter agar dapat mencegah dan mengendalikan bahaya <i>temperature</i> dan tekanan (Ahmad & Oginawati, 2019). Administratif: - Penjadwalan perawatan rutin pada <i>pressure indicator</i> menurut (Rosyidin & Asrorudin, 2021)	Eliminasi: tidak ada Substitusi: tidak ada Rekayasa Teknik: - Melakukan inovasi pada komponen pipa baja karbon dengan komponen pipa yang memiliki sifat anti korosif yang lebih baik yaitu <i>stainless steel</i> tipe 316. Hal ini disebabkan karena unsur logam nikel dan krom yang terkandung dalam stainless steel memiliki kandungan nikel 10% dan kromium 16%. Maka dari itu, <i>stainless steel</i> 316 banyak digunakan pada pipa, komponen mesin, peralatan petrokimia, dan peralatan industry lainnya. (Syaiful et al., n.d.) Administratif: - Melakukan pengendalian yang dapat dilakukan dengan penambahan <i>Safety Instrumented System</i> berupa transmitter agar dapat mencegah dan mengendalikan bahaya <i>temperature</i> dan tekanan (Ahmad & Oginawati, 2019) Administratif: - Memeriksa hasil kualitas kualitas Iodine Value

<p>dibutuhkan perawatan secara rutin pada <i>pressure indicator</i> agar mendapatkan hasil maksimal dalam proses produksi.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Memeriksa kondisi sistem <i>manifold</i> gas dalam kondisi baik <p>APD: <i>Goggles Glass</i> dengan kriteria berdasarkan standar (<i>American National Standard ANSI/ISEA Z87.1, 2020</i>) adalah sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Resistansi kimia: Kacamata pelindung harus dapat menahan paparan bahan kandungan kimia catalyst. b. Kenyamanan untuk penggunaanya harus dilengkapi dengan bantalan karet wajah yang lembut, tali kepala dan desain yang ergonomis. c. Kacamata menggunakan ventilasi tidak langsung (tipe <i>eyecup</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Memeriksa sistem manifold gas dalam kondisi baik <p>APD: <i>Goggles Glass</i> dengan kriteria berdasarkan standar (<i>American National Standard ANSI/ISEA Z87.1, 2020</i>) adalah sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Resistansi kimia: Kacamata pelindung harus dapat menahan paparan bahan kandungan kimia catalyst. b. Kenyamanan untuk penggunaanya harus dilengkapi dengan bantalan karet wajah yang lembut, tali kepala dan desain yang ergonomis. c. Kacamata menggunakan ventilasi tidak langsung (tipe <i>eyecup</i>)
---	---

Berdasarkan hasil analisis rekomendasi yang ada kemudian dilakukan penilaian risiko tambahan untuk menurunkan nilai risiko. Adapun hasil dari perhitungannya dapat dilihat pada tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Penilaian Risiko Setelah Pengendalian

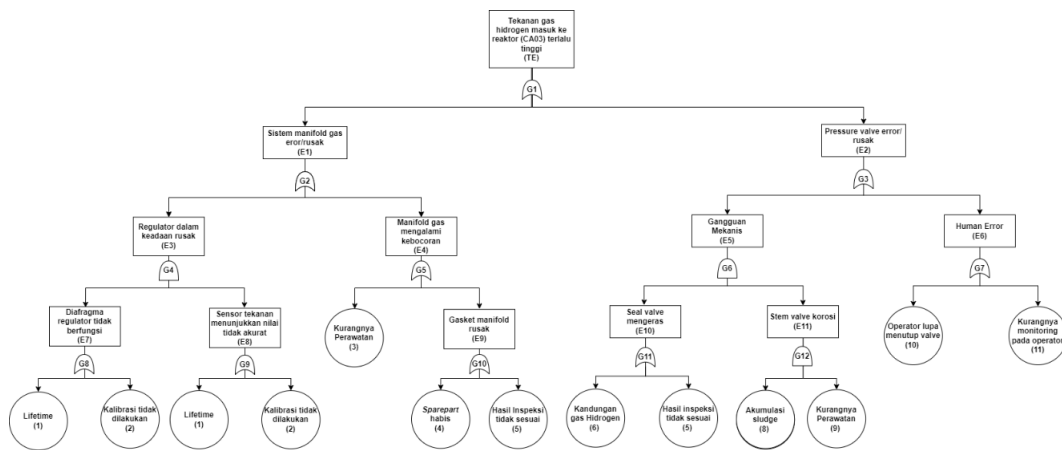
Node	Deviasi	L	S	Risiko Awal	Kategori Risiko	L	S	Risiko Pengendalian	Kategori pengendalian
4	Tekanan gas H ₂ masuk terlalu tinggi	2	5	10	Tidak dapat diterima	1	4	4	Dapat diterima
	Suhu pada reaktor terlalu tinggi	3	3	9	Tidak dapat diterima	2	2	4	Dapat diterima

Dari hasil analisis penilaian risiko yang didapatkan nilai dari risiko dapat diturunkan menjadi 4 sehingga menjadi diterima dari hasil pengendalian yang diberikan. Oleh karena itu, dilakukan lanjutan analisis dengan menggunakan *Fault Tree Analysis (FTA)* untuk memaksimalkan hasil analisis identifikasi bahaya yang dilakukan.

3.6 Fault Tree Analysis (FTA)

Dari tahapan yang sebelumnya menggunakan HAZOP belum dapat disimpulkan terkait penyebab dasar dari identifikasi bahaya yang dilakukan. Sehingga diperlukan analisis metode FTA yang dilakukan dengan *brainstorming* dan diskusi bersama *expert judgment*. Adapun hasil dari penilaian yang dilakukan dapat dilihat pada berikut ini.

- a. FTA Tekanan Gas Hidrogen Masuk Terlalu Tinggi



Gambar 2. FTA Tekanan Gas Hidrogen masuk ke reaktor terlalu tinggi

Pada **Gambar 2** didapatkan hasil sebanyak 11 *basic cause* yang berperan dalam menyebabkan *top event* (TE). Masing-masing event diberi kode untuk mempermudah proses perhitungan minimal *cut set*. *Intermediate event* diberi kode dari E1 sampai E11, sedangkan *basic event* diberi nomor dari 1 hingga 11. Perbedaan jumlah basic event dengan nomor urut disebabkan oleh adanya beberapa *basic event* yang sama.

Terdapat 2 *gate* dalam **gambar 4.8** yaitu AND *gate* dan OR *gate*. Contoh AND *gate* ditunjukkan pada *gate* 4 pada kejadian “regulator dalam keadaan rusak” akan terjadi ketika “Diafragma regulator tidak berfungsi” dan “Sensor tekanan menunjukkan nilai tidak akurat” terjadi, sedangkan OR *gate* ditunjukkan pada *gate* 2 pada kejadian “Sistem manifold gas eror/rusak” terjadi jika salah satu antara kejadian “regulator dalam keadaan rusak” atau “Manifold gas mengalami kebocoran” terjadi. Untuk *intermediate event* dan *gate* lainnya juga dibaca dengan cara yang sama. Berikut perhitung *cut set* dari diagram FTA dengan metode *bottom-up*.

Cut set E2

$$\begin{aligned}
 E5 &= E10 \cdot E11 \\
 E10 &= 6 + 5 \\
 E11 &= 7 \cdot 8 \\
 E5 &= 6 + 5 \cdot (7 \cdot 8) \text{ (aturan distributif)} \\
 E5 &= 6 \cdot 7 \cdot 8 + 5 \cdot 7 \cdot 8 \\
 E6 &= 9 + 10 \\
 E2 &= E5 + E6 \\
 E2 &= 6 \cdot 7 \cdot 8 + 5 \cdot 7 \cdot 8 + 9 + 10
 \end{aligned}$$

Cut set E1

$$\begin{aligned}
 E3 &= E7 \cdot E8 \\
 E7 &= 1 + 2 \\
 E8 &= 1 + 2 \\
 E3 &= (1 + 2) \cdot (1 + 2) \text{ (aturan idempotent)} \\
 E3 &= 1 + 2 \\
 E4 &= 3 + E9 \\
 E4 &= 3 + 4 + 5 \\
 E1 &= E3 + E4 \\
 E1 &= 1 + 2 + 3 + 4 + 5
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan *cut set*, diperoleh hasil untuk *top* tekanan gas hidrogen masuk ke reaktor terlalu tinggi seperti berikut ini.

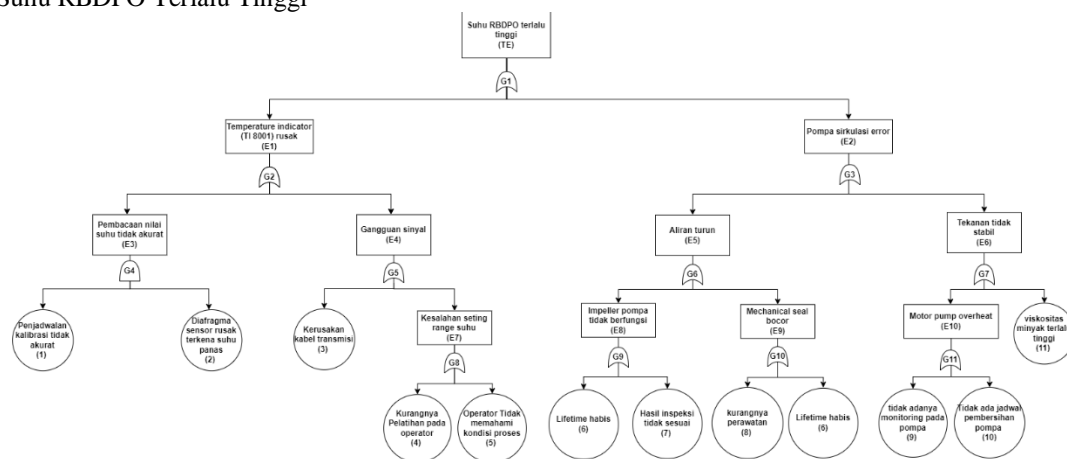
$$\begin{aligned}
 TE &= E1 + E2 \\
 &= 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 \cdot 7 \cdot 8 + 5 \cdot 7 \cdot 8 + 9 + 10
 \end{aligned}$$

Tabel 7 Minimal *Cut Set* tekanan gas hidrogen masuk ke reaktor terlalu tinggi

<i>Minimal Cut Set</i>	<i>Keterangan Basic Event</i>
1	<i>Lifetime habis</i>
2	Kalibrasi tidak dilakukan
3	Kurangnya perawatan
4	Sparepart habis
5	Hasil inspeksi tidak sesuai
6.7.8	Kandungan gas hydrogen, akumulasi <i>sludge</i> dan coating gagal
5.7.8	Hasil inspeksi tidak sesuai, akumulasi <i>sludge</i> dan coating gagal
9	Operator lupa menutup valve
10	Kurangnya monitoring pada operator

Tekanan gas hydrogen masuk ke reaktor terlalu tinggi dapat terjadi ketika salah satu *basic event* tunggal seperti *basic event* 1 (*lifetime* habis) atau salah satu gabungan 3 *basic event* seperti *basic event* 6, 7 dan 8 (Kandungan gas hydrogen, akumulasi *sludge* dan coating gagal).

b. Suhu RBDPO Terlalu Tinggi



Gambar 3. FTA Suhu RBDPO Terlalu Tinggi

Pada Gambar 3 didapatkan hasil sebanyak 11 *basic cause* yang berperan dalam menyebabkan *top event* (TE). Masing-masing event diberi kode untuk mempermudah proses perhitungan *minimal cut set*. *Intermediate event* diberi kode dari E1 sampai E10, sedangkan *basic event* diberi nomor dari 1 hingga 11. Perbedaan jumlah *basic event* dengan nomor urut disebabkan oleh adanya beberapa *basic event* yang sama.

Terdapat 2 *gate* dalam gambar 4.9 yaitu AND *gate* dan OR *gate*. Contoh AND *gate* ditunjukkan pada *gate* 4 pada kejadian “pembacaan nilai suhu tidak akurat” akan terjadi ketika “penjadwalan kalibrasi tidak akurat” dan “Diafragma sensor rusak terkena suhu panas” terjadi, sedangkan OR *gate* ditunjukkan pada *gate* 2 pada kejadian “Gangguan sinyal” terjadi jika salah satu antara kejadian “Kerusakan kabel transmisi” atau “Kesalahan setting range suhu” terjadi. Untuk *intermediate event* dan *gate* lainnya juga dibaca dengan cara yang sama. Berikut perhitung *cut set* dari diagram FTA dengan metode *bottom-up*.

Cut set E2

$$\begin{aligned}
 E5 &= E8 + E9 \\
 E8 &= 6 + 7 \\
 E9 &= 6 + 8 \\
 E5 &= 6 + 7 + 6 + 8 \text{ (aturan idempoten)} \\
 E5 &= 6 + 7 + 8 \\
 E6 &= E10 + 11 \\
 E6 &= 9 + 10 + 11 \\
 E2 &= E5 + E6 \\
 E2 &= 6 + 7 + 8 + 9 + 10 + 11
 \end{aligned}$$

Cut set E1

$$E3 = 1 . 2$$

$$E4 = 3 + E7$$

$$E4 = 3 + 4 + 5$$

$$E1 = E3 \cdot E4$$

$$E1 = (1 \cdot 2) \cdot (3 + 4 + 5) \text{ (aturan distributif)}$$

$$E1 = 1 \cdot 2 \cdot 3 + 1 \cdot 2 \cdot 4 + 1 \cdot 2 \cdot 5$$

Berdasarkan perhitungan *cut set*, diperoleh hasil untuk *top* suhu RBDPO terlalu tinggi seperti berikut ini.
 $TE = E1 + E2$
 $= 1 \cdot 2 \cdot 3 + 1 \cdot 2 \cdot 4 + 1 \cdot 2 \cdot 5 + 6 + 7 + 8 + 9 + 10 + 11$

Tabel 8. *Minimal Cut Set* tekanan gas hidrogen masuk ke reaktor terlalu tinggi

<i>Minimal Cut Set</i>	<i>Keterangan Basic Event</i>
1.2.3	Penjadwalan kalibrasi tidak akurat, diafragma sensor rusak terkena suhu panas dan kerusakan kabel transmisi
1.2.4	Penjadwalan kalibrasi tidak akurat, diafragma sensor rusak terkena suhu panas dan kurangnya pelatihan pada operator
1.2.5	Penjadwalan kalibrasi tidak akurat, diafragma sensor rusak terkena suhu panas dan operator tidak memahami kondisi proses
6	<i>Lifetime</i> habis
7	Hasil inspeksi tidak sesuai
8	Kurangnya perawatan
9	Tidak adanya monitoring pada pompa
10	Tidak ada jadwal pembersihan pompa
11	Viskositas minyak terlalu banyak

Suhu RBDPO terlalu tinggi dapat terjadi ketika salah satu *basic event* tunggal seperti *basic event 6* (*lifetime* habis) atau salah satu gabungan 3 *basic event* seperti *event 1, 2 dan 3* (Penjadwalan kalibrasi tidak akurat, diafragma sensor rusak terkena suhu panas dan kerusakan kabel transmisi).

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang ada dapat disimpulkan sebagai berikut.

- Hasil analisis bahaya menggunakan metode *Hazard and Operability* (HAZOP) pada *hydrogenation plant* mendapatkan hasil 1 risiko tinggi dan 1 risiko sedang.
- Pengendalian yang dapat dilakukan yaitu mencegah terjadinya kebocoran pada pipa jalur hidrogen bocor, menggunakan hierarki pengendalian berdasarkan hasil analisa kategori risiko berupa pergantian *stainless steel* ke tipe 316, penambahan *pressure transmitter*, Melakukan pengendalian dengan melakukan perancangan sistem proteksi kebakaran aktif berupa *sprinkler* ,perawatan secara rutin pada *pressure indicator*, memeriksa kondisi manifold gas dalam kondisi baik, membuat perencanaan *safety training* yang diperlukan dan pengoptimalan APD.
- Hasil analisis bahaya menggunakan metode *fault tree analysis* (FTA) dari 2 *top event* didapatkan penyebab dasar yaitu tekanan gas hydrogen masuk ke reaktor (CA 03) terlalu tinggi didapatkan 9 penyebab dasar, suhu RBDPO terlalu tinggi didapatkan 9 penyebab dasar.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih khusus disampaikan kepada [Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya] atas izin dan fasilitas yang diberikan selama proses pengumpulan data. Penulis juga menghargai bantuan dan kerja sama dari rekan-rekan teknis serta petugas lapangan yang telah membantu dalam kegiatan observasi dan pengujian.

Tidak lupa, apresiasi diberikan kepada dosen pembimbing serta rekan sejawat atas masukan dan saran yang sangat berharga dalam penyusunan dan penyempurnaan penelitian ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif dalam peningkatan keselamatan kerja di lingkungan kerja ruang terbatas.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, B., & Oginawati, K. (2019). ANALISIS RISIKO DENGAN METODE HAZARD AND OPERABILITY STUDY (HAZOPS) DALAM PENENTUAN SAFETY INTEGRITY LEVEL (SIL) BERBASIS RISK GRAPH DAN QUANTITATIVE METHOD PADA UNIT BOILER PT X RISK ANALYSIS USING HAZARD OPERABILITY STUDY (HAZOPS) METHOD FOR DETERMINING SAFETY INTEGRITY LEVEL BASED ON RISK GRAPH AND QUANTITATIVE METHOD IN BOILER UNIT OF PT X. In *Jurnal Teknik Lingkungan* (Vol. 25).
- American National Standard for Occupational and Educational Personal Eye and Face Protection Devices*. (2020).
- Anjani, I. G., Saputri, A. B., Armeira, & Azka Nabalalah Putri Januarita, D. (2022). Analisis Konsumsi Dan Produksi Minyak Kelapa Sawit Di Indonesia Dengan Menerapkan Metode Moving Average. *JURIKOM (Jurnal Riset Komputer)*, 9(4), 1014. <https://doi.org/10.30865/jurikom.v9i4.4506>
- Hazard and operability studies (HAZOP studies): application guide*. (2016). International Electrotechnical Commission.
- Molkov, V. V., Cirrone, D. M. C., Shentsov, V. V., Dery, W., Kim, W., & Makarov, D. V. (2021). Dynamics of blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire in the open atmosphere. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(5), 4644–4665. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.211>
- Nur, M. (2018). Analisis Keselamatan dan Kesehatan Kerja Menggunakan Metode Hazard And Operability Study (HAZOP) Di PT. XYZ. In *Jurnal Teknik Industri* (Vol. 4, Issue 2).
- Occupational Safety and Health Standards (OSHA) 29 CFR 1910 THIS DOCUMENT CONTAINS ONLY THE SECTIONS NEEDED FOR THE API 1169 ICP EXAMS*. (n.d.).
- Rosyidin, A., & Asrorudin, J. &. (2021). ANALISIS MESIN PRESSURE JUS BUAH (MESIN X-1 IPX4) TIDAK TERCAPAI PRESSURE 1500 BAR PADA PRESSURE INDIKATOR. 5(1).
- Syaiful, A. Z., Tang, M., Dwita, J., Kada, R. B., & Kimia, P. T. (n.d.). ANALISIS LAJU KOROSI DAN LIFETIME MATERIAL STAINLESS STEEL.
- Zulfiana Erna, & Musyafa Ali. (n.d.). Analisis Bahaya dengan Metode Hazop dan Manajemen Risiko pada Steam Turbine PLTU di Unit 5 Pembangkitan Listrik Paiton (PT. YTL Jawa Timur).