

Risk Management Strategies for Occupational Safety in Ammonia Production

Riny Yolandha Parapat^{1*}, Bunga Pertiwi Triani Putri², Christopher Febrian Hilman³

^{1,2,3}Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
Email: ¹rinyyolandha@itenas.ac.id, ²bunga.pertiwi@mhs.itenas.ac.id,
³christopher.febrian@mhs.itenas.ac.id

Abstrak

Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) merupakan aspek mendasar dalam kegiatan industri karena memainkan peran penting dalam melindungi pekerja dari potensi bahaya yang dapat menyebabkan kecelakaan atau penyakit akibat kerja. Tingginya tingkat risiko operasional, terutama di industri yang melibatkan penggunaan mesin, energi, dan bahan kimia, menuntut penerapan sistem manajemen K3 yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pentingnya penerapan K3 dalam meningkatkan keselamatan di tempat kerja dan mengurangi risiko kecelakaan di lingkungan industri. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah tinjauan pustaka terhadap berbagai peraturan, standar keselamatan, dan praktik penerapan K3 di sektor industri. Temuan menunjukkan bahwa penegakan peraturan K3, peningkatan pelatihan dan kesadaran pekerja, penggunaan alat pelindung diri (APD), pengelolaan bahan kimia berbahaya, serta manajemen risiko yang sistematis merupakan faktor kunci dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman. Penerapan budaya keselamatan yang konsisten tidak hanya mengurangi kecelakaan di tempat kerja tetapi juga meningkatkan produktivitas, efisiensi operasional, dan keberlanjutan korporat. Oleh karena itu, implementasi K3 yang komprehensif merupakan kebutuhan strategis dalam mendukung operasi industri yang aman dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Alat Pelindung Diri (APD), Kesehatan Dan Keselamatan Kerja (K3), Keselamatan Proses Industri, Manajemen Risiko Industri, Sistem Manajemen K3*

Abstract

Occupational Health and Safety (OHS) is a fundamental aspect of industrial activities as it plays a crucial role in protecting workers from potential hazards that may lead to accidents or occupational diseases. The high level of operational risk, particularly in industries involving the use of machinery, energy, and chemicals, requires the implementation of an effective and sustainable OHS management system. This study aims to analyze the importance of OHS implementation in improving workplace safety and reducing the risk of accidents in industrial environments. The method used in this research is a literature review of various regulations, safety standards, and OHS implementation practices in the industrial sector. The findings indicate that the enforcement of OHS regulations, enhancement of worker training and awareness, use of personal protective equipment (PPE), management of hazardous chemicals, and systematic risk management are key factors in creating a safe working environment. Consistent implementation of a safety culture not only reduces workplace accidents but also enhances productivity, operational efficiency, and corporate sustainability. Therefore, comprehensive OHS implementation is a strategic necessity in supporting safe and sustainable industrial operations.

Keywords: *Industrial Process Safety, Industrial Risk Management, Occupational Health And Safety (OHS), OHS Management System, Personal Protective Equipment (PPE)*

1. PENDAHULUAN

Industri pupuk memainkan peran penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional, terutama di negara agraris seperti Indonesia. Salah satu bahan baku utama dalam produksi pupuk nitrogen adalah amonia (NH_3), yang dihasilkan melalui proses kimia yang kompleks yang melibatkan berbagai tahap operasional dalam kondisi proses yang ekstrem. Proses produksi amonia umumnya berlangsung pada suhu dan tekanan tinggi serta melibatkan gas yang mudah terbakar dan reaktif. Kondisi ini berarti bahwa industri pupuk, khususnya di unit produksi amonia, menghadapi risiko potensial yang tinggi terkait keselamatan kerja, kerusakan peralatan, dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan upaya

sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengendalikan potensi bahaya yang mungkin terjadi selama proses produksi. (Chaiprakarn et al., 2025; Gumelaringtyas & Adriantantri, 2026; Zhang et al., 2023)

Salah satu perusahaan pupuk terbesar di Indonesia mengoperasikan pabrik amonia modern yang dilengkapi dengan sistem proses terintegrasi. Dalam proses produksi ini, konverter amonia merupakan unit krusial yang berfungsi sebagai reaktor utama tempat reaksi sintesis antara gas nitrogen (N_2) dan hidrogen (H_2) berlangsung untuk menghasilkan amonia. Unit ini beroperasi pada suhu sekitar 400–500°C dan tekanan melebihi 100 atm, sehingga memerlukan pengendalian operasional yang sangat ketat. Bahkan penyimpangan kecil dalam kondisi operasi dapat menyebabkan berbagai masalah, seperti kerusakan peralatan, degradasi katalis, kebocoran gas, dan bahkan potensi ledakan. Risiko-risiko ini tidak hanya membahayakan keselamatan pekerja dan peralatan industri, tetapi juga dapat menyebabkan dampak lingkungan akibat pelepasan gas amonia yang beracun dan korosif. (Ab Rahim et al., 2024)

Dalam industri proses kimia, salah satu metode yang paling umum digunakan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi bahaya adalah metode Hazard and Operability Study (HAZOP). Metode ini merupakan pendekatan analisis risiko sistematis yang dilakukan oleh tim multidisiplin dengan menggunakan kata kunci untuk meninjau setiap komponen sistem proses. Melalui metode ini, berbagai potensi penyimpangan dari kondisi operasi normal dapat diidentifikasi, beserta penyebab, konsekuensinya, serta rekomendasi mitigasi yang diperlukan untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem proses. (Yusuf, 2026)

Selain faktor teknis dan operasional, penerapan analisis risiko di industri kimia juga dipengaruhi oleh persyaratan regulasi dan standar keselamatan kerja. (Abbasi et al., 2026; Jani & Dalei, 2015) Industri kimia diwajibkan untuk menerapkan sistem manajemen keselamatan yang sesuai dengan peraturan nasional mengenai Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) serta standar internasional seperti ISO 45001 dan IEC 61511, yang menekankan pentingnya manajemen keselamatan proses. Oleh karena itu, penerapan metode analisis risiko seperti HAZOP merupakan komponen penting dalam upaya meningkatkan keselamatan operasional dan memastikan kepatuhan terhadap peraturan yang berlaku.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode HAZOP pada berbagai unit di dalam pabrik amonia. Sebuah penelitian oleh Noriyanti dkk. melakukan analisis HAZOP pada bagian Pembakar Gas Bahan Bakar Superheat (Nakyai et al., 2025; Noriyati et al., 2017), sementara Musyaffa dkk. meneliti penerapan HAZOP pada sistem uap (Kubra & Soloman, 2025; Musyafa' et al., 2019). Selain itu, Solomon dkk. melakukan analisis pada bagian reforming (P Sunilkumar & P A, 2023), sedangkan Roy dkk. meneliti penerapan HAZOP pada sistem bahan bakar amonia (Abraham et al., 2025; Roy et al., 2011). Meskipun berbagai penelitian ini telah dilakukan, penelitian yang secara khusus berfokus pada unit konverter amonia masih relatif terbatas, padahal unit ini merupakan salah satu komponen paling kritis dalam proses produksi amonia.

Berdasarkan latar belakang ini, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi bahaya pada unit konverter amonia, menganalisis penyebab dan konsekuensi dari potensi penyimpangan operasional, serta memberikan rekomendasi mitigasi untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada penguatan budaya keselamatan di industri pupuk dan mendukung keberlanjutan operasi pabrik melalui penerapan manajemen risiko yang lebih efektif.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis kualitatif deskriptif dengan metode Hazard and Operability Study (HAZOP) untuk mengidentifikasi potensi bahaya dan penyimpangan operasional pada unit konverter amonia di sebuah pabrik produksi amonia. Metode HAZOP dipilih karena merupakan metode analisis risiko sistematis yang banyak digunakan dalam industri proses kimia untuk mengevaluasi potensi bahaya operasional dan meningkatkan keselamatan proses.

2.2. Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian ini berfokus pada unit konverter amonia, yang merupakan komponen kunci dari proses sintesis amonia di sebuah pabrik pupuk di Indonesia. Unit ini berfungsi sebagai reaktor tempat reaksi sintesis antara gas nitrogen (N_2) dan hidrogen (H_2) untuk membentuk amonia (NH_3) berlangsung dalam kondisi suhu dan tekanan tinggi. Analisis ini berfokus pada sistem proses yang berkaitan dengan aliran gas reaktan, kondisi operasi reaktor, dan sistem kontrol yang berperan dalam menjaga stabilitas operasional. Isi Metode Penelitian umumnya hanya mencakup 20-30% dari keseluruhan paper.

2.3. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui beberapa metode, yaitu:

- a. Pengumpulan Data
Pengumpulan informasi terkait proses produksi amonia, metode analisis risiko, dan penerapan metode HAZOP di industri kimia, yang diperoleh dari jurnal ilmiah, buku referensi, dan standar keselamatan industri.
- b. Dokumentasi Teknis Proses
Data teknis diperoleh dari dokumen proses seperti Diagram Alur Proses (PFD), Diagram Perpipaan dan Instrumentasi (P&ID), serta data kondisi operasional termasuk suhu, tekanan, dan laju aliran di unit konverter amonia.
- c. Diskusi dengan Para Ahli (Penilaian Ahli)
Proses identifikasi bahaya dilakukan melalui diskusi dengan tim teknis yang memahami karakteristik operasional unit konverter amonia, termasuk operator proses, teknisi, dan insinyur proses

2.4. Tahapan Analisis HAZOP

Secara umum, analisis HAZOP di industri dilakukan melalui tahapan-tahapan berikut:

- a. Pembentukan Tim HAZOP
Pembentukan tim HAZOP merupakan langkah krusial untuk memastikan proses analisis bahaya yang efektif. Tim ini terdiri dari personel multidisiplin, termasuk insinyur proses, operator senior, insinyur instrumentasi, petugas keselamatan, dan supervisor unit. Setiap anggota dipilih berdasarkan keahlian dan pengalaman mereka terkait sistem sintesis amonia. Keragaman ini memungkinkan identifikasi dan evaluasi bahaya potensial secara komprehensif, sementara kolaborasi yang efektif memastikan analisis yang akurat dan strategi mitigasi risiko yang tepat.
- b. Pengumpulan Data dan Informasi Teknis
Pengumpulan data dan informasi teknis dilakukan untuk mendukung perancangan dan pelaksanaan analisis HAZOP pada sistem yang diteliti. Data yang dikumpulkan meliputi Diagram Pipa dan Instrumentasi (P&ID) unit sintesis amonia, Prosedur Operasi Standar (SOP), spesifikasi desain beserta kondisi operasi normal, serta catatan kegagalan atau insiden sebelumnya, jika tersedia. Data ini berfungsi sebagai referensi penting untuk memastikan bahwa proses identifikasi bahaya akurat, sistematis, dan selaras dengan kondisi operasi yang sebenarnya.
- c. Identifikasi Simpul dan Parameter
Sistem ini dibagi menjadi beberapa simpul berdasarkan batas-batas logis dan fungsional. Setiap simpul dianalisis menggunakan parameter utama seperti tekanan, laju aliran, suhu, dan komposisi.
- d. Analisis Menggunakan Kata Kunci
Untuk setiap kombinasi simpul dan parameter, kata kunci seperti Tidak, Lebih, Kurang, Dan, dan Terbalik, dll., digunakan untuk mengidentifikasi potensi penyimpangan dari kondisi normal. Setiap penyimpangan kemudian dianalisis berdasarkan penyebab, dampak, sistem pengendalian yang ada, dan tindakan korektif yang direkomendasikan (jika diperlukan).
- e. Dokumentasi dan Evaluasi
Semua temuan didokumentasikan dalam lembar kerja HAZOP. Rekomendasi kemudian dievaluasi dan dikategorikan sesuai dengan tingkat risikonya menggunakan matriks risiko khusus perusahaan.

2.5. Matriks Penilaian Risiko

Untuk mendukung evaluasi hasil HAZOP, digunakan matriks risiko dua dimensi (Gambar 1) yang didasarkan pada probabilitas.

		Kemungkinan Terjadi				
		1 (Sangat Tidak Mungkin)	2 (Tidak Mungkin)	3 (Bisa Terjadi)	4 (Mungkin)	5 (Sangat Mungkin)
Keparahan	1 (Tidak Parah)	1	2	3	4	5
	2 (Minor)	2	4	6	8	10
	3 (Moderat)	3	6	9	12	15
	4 (Parah)	4	8	12	16	20
	5 (sangat Parah)	5	10	15	20	25

Gambar 1. Matriks Risiko HAZOP

2.6. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari proses identifikasi HAZOP kemudian dianalisis secara deskriptif dengan menyusun tabel analisis yang mencakup parameter proses, potensi penyimpangan, penyebab, konsekuensi, tingkat risiko, dan rekomendasi perbaikan. Hasil analisis ini digunakan untuk memprioritaskan pengendalian risiko di unit konverter amonia, sehingga meningkatkan keselamatan proses dan memastikan kelangsungan operasi pabrik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Deskripsi Proses Produksi Amonia

Produksi amonia industri umumnya dilakukan menggunakan proses Haber–Bosch, suatu proses sintesis yang menggabungkan gas nitrogen (N₂) dan gas hidrogen (H₂) dengan perbandingan molar 1:3 untuk menghasilkan gas amonia (NH₃). Reaksi ini berlangsung dalam kondisi suhu dan tekanan tinggi di dalam sistem yang dikenal sebagai loop sintesis. Sistem ini didukung oleh unit pendingin yang memurnikan dan mencairkan amonia yang terbentuk selama reaksi.

3.2. Tahap Kompresi dan Persiapan Gas Bahan Baku

Gas bahan baku yang berasal dari unit proses sebelumnya, seperti methanator, terlebih dahulu dikompresi untuk mencapai kondisi operasi optimal di konverter amonia. Tekanan operasi di unit ini biasanya berkisar antara 150–300 bar, dengan suhu operasi sekitar 400–500°C. Proses kompresi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi reaksi karena reaksi pembentukan amonia merupakan reaksi eksotermik yang disertai dengan penurunan jumlah mol gas. Berdasarkan prinsip kesetimbangan kimia, peningkatan tekanan memindahkan kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan produk, yaitu amonia.

Sebelum masuk ke reaktor, gas umpan juga harus melalui proses pemurnian untuk menghilangkan air dan kotoran lain yang dapat mengganggu kinerja katalis. Proses pemurnian ini biasanya dilakukan menggunakan sistem adsorpsi atau kondensasi. Gas yang telah dimurnikan dan dikeringkan kemudian dimasukkan ke dalam konverter amonia atau reaktor sintesis.

3.3. Proses Reaksi dalam Konverter Amonia

Reaksi utama yang terjadi dalam konverter amonia adalah reaksi sintesis antara nitrogen dan hidrogen, yang dapat ditulis sebagai berikut:



Reaksi ini bersifat eksotermik, artinya melepaskan panas selama proses berlangsung. Untuk mempercepat laju reaksi, proses sintesis amonia menggunakan katalis berbasis besi (Fe), yang biasanya

ditingkatkan dengan oksida logam seperti K_2O , Al_2O_3 , dan CaO untuk meningkatkan aktivitas katalitik dan stabilitas katalis. Secara termodinamika, reaksi pembentukan amonia lebih menguntungkan pada kondisi suhu rendah dan tekanan tinggi. Namun, pada suhu yang terlalu rendah, laju reaksi menjadi sangat lambat. Oleh karena itu, kondisi operasi dipilih sebagai kompromi antara aspek kinetika dan termodinamika, sehingga menghasilkan laju reaksi yang cukup tinggi dengan tingkat konversi yang optimal.

3.4. Sistem Loop Sintesis

Dalam sistem loop sintesis, gas nitrogen dan hidrogen disuplai secara terus-menerus ke dalam reaktor sintesis. Selama setiap siklus melalui reaktor, hanya sekitar 15–20% gas bahan baku yang berhasil diubah menjadi amonia. Oleh karena itu, gas yang tidak bereaksi dipisahkan dan didaur ulang kembali ke dalam reaktor untuk meningkatkan efisiensi proses secara keseluruhan. Setelah keluar dari reaktor, campuran gas yang terdiri dari amonia, nitrogen, dan hidrogen disuplai ke sistem pemisahan. Pemisahan dilakukan dengan menurunkan suhu campuran gas hingga amonia mengembun menjadi fase cair, sementara nitrogen dan hidrogen tetap dalam fase gas. Gas yang tidak mengembun kemudian dikompresi ulang dan disalurkan kembali ke reaktor sebagai bagian dari siklus sintesis.

3.5. Sistem Pendingin Amonia

Setelah proses reaksi berlangsung, campuran gas yang mengandung amonia didinginkan menggunakan sistem pendingin amonia. Sistem ini menggunakan amonia cair sebagai refrigeran untuk menurunkan suhu campuran gas hingga sekitar $-33^\circ C$, yang merupakan titik kondensasi amonia pada tekanan atmosfer. Dalam kondisi ini, amonia mengembun dan dipisahkan sebagai produk akhir dalam bentuk cair. Sementara itu, gas yang tidak mengembun, yang umumnya terdiri dari nitrogen dan hidrogen, dikompresi kembali dan disalurkan ke dalam loop sintesis untuk digunakan kembali dalam proses reaksi berikutnya.

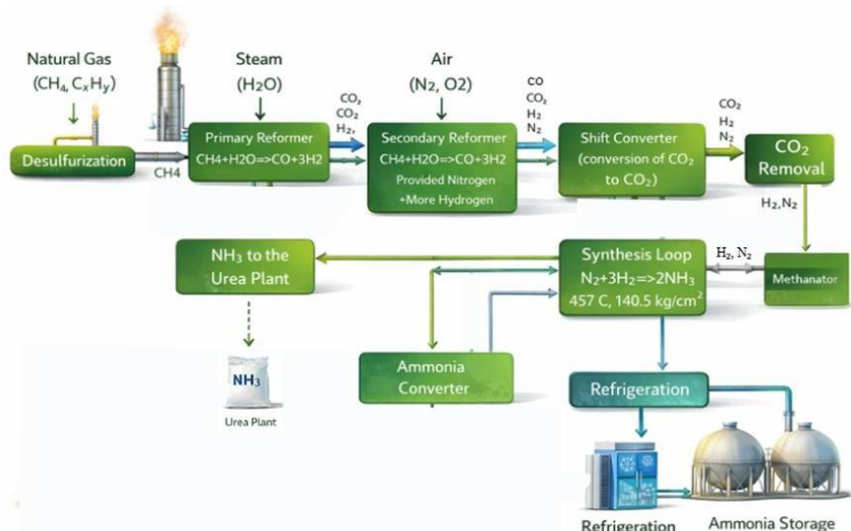
3.6. Deskripsi Proses Produksi Amonia

Proses produksi amonia dimulai dengan penggunaan gas alam dan gas hidrogen sebagai bahan baku utama. Gas alam terlebih dahulu melewati unit penghilang merkuri yang dirancang untuk menghilangkan kandungan merkuri dari aliran gas. Penghilangan merkuri sangat penting karena keberadaan unsur ini dapat merusak katalis dan peralatan di unit proses selanjutnya.

Setelah tahap ini, gas alam dialirkan ke unit penghilang belerang untuk menghilangkan senyawa belerang yang terdapat dalam gas baku. Kehadiran senyawa belerang dapat menyebabkan keracunan katalis selama tahap reforming, sehingga proses pemurnian ini sangat penting untuk menjaga kinerja katalis pada tahap-tahap selanjutnya. Gas yang telah dimurnikan kemudian masuk ke unit reformasi, di mana hidrokarbon dalam gas bereaksi dengan uap untuk menghasilkan campuran gas yang terdiri dari hidrogen (H_2), karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO_2). Campuran gas ini kemudian dialirkan ke konverter shift, tempat reaksi shift gas-air terjadi—reaksi antara CO dan uap untuk menghasilkan hidrogen dan karbon dioksida tambahan. Selanjutnya, karbon dioksida yang terbentuk dipisahkan di unit penyerap CO_2 , di mana CO_2 diserap oleh larutan penyerap. Gas CO_2 yang diserap kemudian dipisahkan kembali di unit pemisah CO_2 untuk digunakan sebagai bahan baku di pabrik urea. Proses ini tidak hanya meningkatkan kemurnian gas sintesis tetapi juga meningkatkan efisiensi integrasi proses antara pabrik amonia dan pabrik urea.

Sisa kandungan CO dan CO_2 yang masih terdapat dalam aliran gas kemudian diubah menjadi metana melalui proses metanasi di dalam unit metanator. Tahap ini bertujuan untuk menghilangkan jejak CO dan CO_2 yang dapat mengganggu reaksi sintesis amonia pada tahap berikutnya. Gas sintesis yang telah dimurnikan, yang kaya akan hidrogen dan nitrogen, kemudian dikompresi hingga mencapai kondisi operasi yang diperlukan sebelum disalurkan ke reaktor sintesis amonia (konverter amonia). Di dalam reaktor ini, nitrogen dan hidrogen bereaksi di bawah kondisi tekanan dan suhu tinggi dengan bantuan katalis untuk menghasilkan amonia (NH_3). Amonia yang dihasilkan kemudian didinginkan melalui sistem pendingin, menyebabkan kondensasi dan memungkinkan pemisahannya dari gas yang

tidak bereaksi. Amonia cair yang dihasilkan kemudian disimpan dalam tangki penyimpanan khusus, sementara sebagian aliran amonia dialirkan ke pabrik urea untuk diproses lebih lanjut menjadi pupuk urea.



Gambar 2. Diagram alir proses sintesis amonia

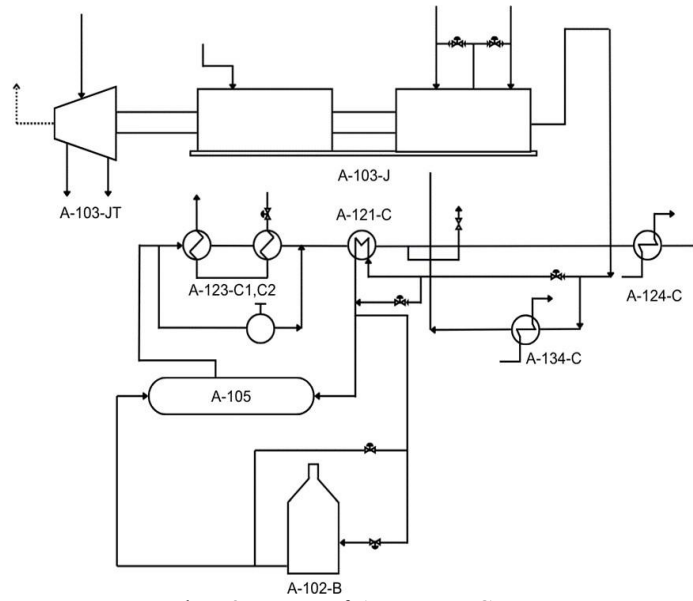
3.7. Analisis HAZOP

Untuk mengidentifikasi potensi bahaya yang mungkin terjadi selama pengoperasian unit konverter amonia dan peralatan pendukungnya, dilakukan analisis menggunakan metode Hazard and Operability Study (HAZOP). Metode ini merupakan pendekatan analisis risiko sistematis yang dirancang untuk mengidentifikasi kemungkinan penyimpangan dari kondisi operasi normal yang dapat menyebabkan bahaya keselamatan, dampak lingkungan, atau gangguan pada operasi proses.

Analisis HAZOP dalam studi ini berfokus pada beberapa parameter proses utama, yaitu tekanan, suhu, dan laju aliran di sejumlah unit kritis dalam sistem sintesis amonia. Unit-unit yang dianalisis meliputi konverter amonia, pembakar gas, kompresor, dan sistem pendingin. Melalui metode ini, setiap potensi penyimpangan dianalisis untuk mengidentifikasi penyebab penyimpangan, konsekuensi yang mungkin terjadi, pengaman yang ada, serta tindakan mitigasi yang direkomendasikan untuk mengurangi tingkat risiko yang ada. Hasil analisis HAZOP kemudian disusun ke dalam tabel analisis yang mencakup parameter proses, jenis penyimpangan, penyebab, konsekuensi, dan tindakan korektif yang direkomendasikan.

Tabel 1. *Equipment List*

No	Equipment code	Equipment name
1.	A-102-B	Start-up Heater
2.	A-105-D	Ammonia Synthesis Converter
3.	A-122-C	Effluent Interchanger
4.	A-103-JT	Compressor
5.	A-103-J	Compressor
6.	A-121-C	Heat exchanger
7.	A-123-C1	Heat exchanger
8.	A-123-C2	Heat exchanger
9.	A-124-C	Heat exchanger
10.	A-134-C	Heat exchanger

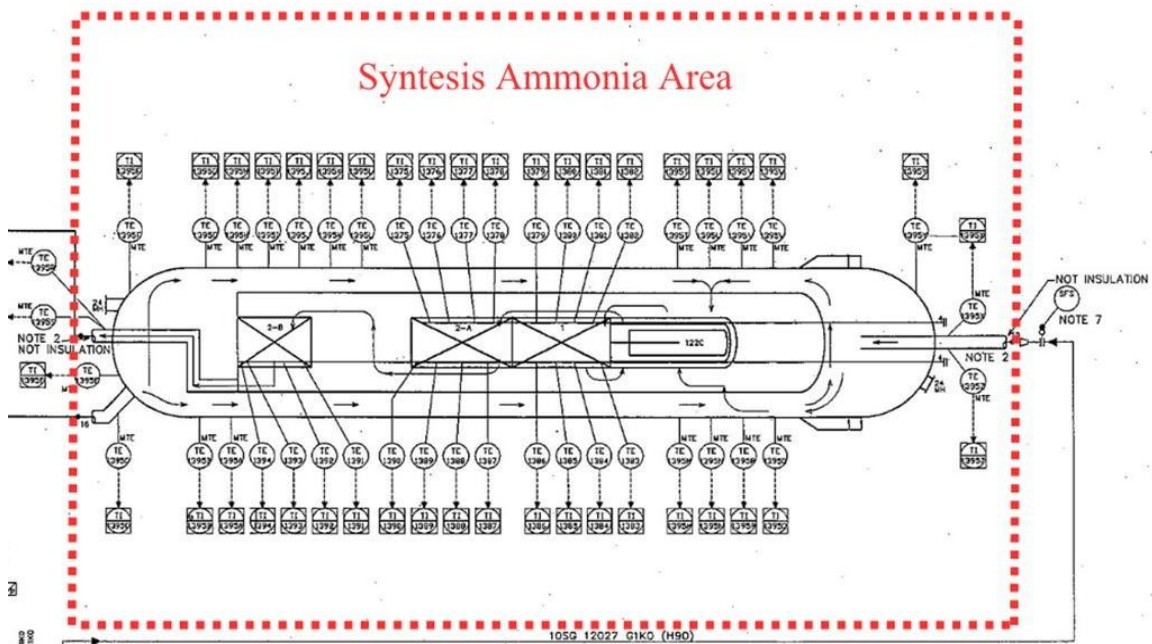


Gambar 3. PFD of Ammonia Converter

A-102-B

A-105-D

A-122-C



Gambar 4. PI&D of Ammonia Synthesis

Table 2. HAZOP Analysis Table

LEMBAR KERJA STUDI HAZOP							
TANGGAL							Parameter
PABRIK							Unit Amonia
DESKRIPSI PROSES							Mengubah nitrogen dan hidrogen menjadi amonia anhidrat menggunakan katalis berbasis besi pada tekanan dan temperatur tinggi
PERALATAN							Reaktor Sintesis Amonia
NODE							Tungku
Parameter	Kata Pandu	Deviasi	Penyebab Potensial	Konsekuensi	Proteksi yang Tersedia/Kontrol yang Ada	Tindakan yang Diperlukan/Pengaman Tambahan	Status Rekomendasi
Temperatur	Lebih	Overheating	Fuel valve too open	Coil damage	High temperature alarm & trip , Flame detector	Install explosion vent and pressure relief system	Recommended
Temperatur	Kurang	Low temperature	Burner unstable	Feed not heated	Temperature indicator (TI), basic control system in A- 102-B	Install low-temperature alarm and burner stability monitoring system	Recommended
Laju Bahan Bakar	Alir Lebih	Excess fuel	Control valve failure	Overheating/fire risk	Flow indicator control (FIC) system	Install high fuel flow alarm and automatic fuel shut-off interlock	Recommended
Laju Bahan Bakar	Alir Tidak Ada	No fuel	Fuel supply failure	Process shutdown	Fuel pressure indicator	Install fuel supply backup system and low-fuel pressure alarm	Recommended
Tekanan	Lebih	High furnace pressure	Blocked exhaust	Explosion hazard	Pressure indicator (PI)	Install explosion vent and pressure relief system	Recommended

LEMBAR KERJA STUDI HAZOP							
TANGGAL							Parameter
PABRIK							Unit Amonia
DESKRIPSI PROSES							mengubah nitrogen dan hidrogen menjadi amonia anhidrat menggunakan katalis berbasis besi pada tekanan dan temperatur tinggi
PERALATAN							Reaktor Sintesis Amonia
NODE							Reactor Inlet
Parameter	Kata Pandu	Deviasi	Penyebab Potensial	Konsekuensi	Proteksi yang Tersedia/Kontrol yang Ada	Tindakan yang Diperlukan/Pengaman Tambahan	Status Rekomendasi
Temperatur	Kurang	Low inlet temperature	Poor furnace heating	Low conversion	Temperature indicator & alarm	Install a high-temperature cutoff switch on the reactor	Recommended
Temperatur	Lebih	High inlet temperature	Panas berlebih pada tungku	Catalyst deactivation	Temperature indicator & alarm	Install redundant temperature sensors in A-121-C	Recommended
Tekanan	Lebih	High pressure	Reactor blockage	Vessel rupture risk	Pressure indicator	Install pressure safety valve (PSV) and interlock shutdown system	Recommended
Laju Alir	Kurang	Aliran rendah	Pipe fouling	Unstable reaction	Flow controller	Inspect the heat exchanger (A- 121-C) for fouling	Recommended

LEMBAR KERJA STUDI HAZOP							
TANGGAL							Parameter
PABRIK							Unit Amonia
DESKRIPSI PROSES							mengubah nitrogen dan hidrogen menjadi amonia anhidrat menggunakan katalis berbasis besi pada tekanan dan temperatur tinggi
PERALATAN							Reaktor Sintesis Amonia
NODE							Reactor Bed
Parameter	Kata Pandu	Deviasi	Penyebab Potensial	Konsekuensi	Proteksi yang Tersedia/Kontrol yang Ada	Tindakan yang Diperlukan/Pengaman Tambahan	Status Rekomendasi
Temperatur	Lebih	Hot spot	Exothermic runaway	Catalyst damage	Multi-point temperature monitoring in A-105-D)	Instal quench system	Recommended
Temperatur	Kurang	Low reaction temperature	Cold feed	Low conversion	Interlock high temperature pressure	Install advanced temperature control system and	Recommended

Tekanan	Lebih	High pressure drop	Catalyst fouling	Reactor shutdown	Pressure valve (PRV)	relief	improve feed preheating (A-121-C)	Implement periodic catalyst inspection and install differential pressure monitoring system	Recommended
Laju Alir	Reverse	Reverse flow	Pressure imbalance	Equipment damage	Emergency shutdown system	(ESD)	Install additional non-return valve and flow direction sensor	Recommended	
Komposisi	Selain	Feed contamination	Impurity in feed	Catalyst poisoning	Gas composition analyzer		Install high-sensitivity impurity detector and improve upstream purification system	Recommended	

LEMBAR KERJA STUDI HAZOP

TANGGAL								Parameter
PABRIK	Unit Amonia							
DESKRIPSI PROSES	mengubah nitrogen dan hidrogen menjadi amonia anhidrat menggunakan katalis berbasis besi pada tekanan dan temperatur tinggi							Desain
PERALATAN	Reaktor Sintesis Amonia							
NODE	Reactor Outlet						Operasi	
Parameter	Kata Pandu	Deviasi	Penyebab Potensial	Konsekuensi	Proteksi yang Tersedia/Kontrol yang Ada	Tindakan yang Diperlukan/Pengaman Tambahan	Status Rekomendasi	
Temperatur	Lebih	Product and pipe Overheat	Runaway reaction	Equipment damage	Pressure alarm	Install pressure relief valve (PRV) in A-123-C2 and automatic shutdown interlock	Recommended	
Komposisi	Selain	Product composition not up to standard	Imperfect reaction	Imperfect product	Temperature alarm, Emergency cooling system	Install redundant temperature sensors in A-123-C1 and automatic cooling interlock	Recommended	
Komposisi	Selain	Product composition not up to standard	Imperfect reaction	Imperfect product	Relief valve	Install online product quality analyzer and automatic recycle system	Recommended	

4. DISKUSI

Hasil Studi Bahaya dan Kelayakan Operasi (HAZOP) yang dilakukan pada unit reaktor sintesis amonia dalam penelitian ini menunjukkan bahwa reaktor tersebut merupakan titik kritis dengan potensi bahaya tinggi akibat kondisi operasi ekstrem, yaitu tekanan tinggi dan suhu tinggi. Temuan ini sejalan dengan berbagai studi HAZOP yang telah dipublikasikan mengenai unit serupa, meskipun terdapat perbedaan dalam metodologi dan cakupan analisis. Labovský dan Jelemenský (2015) melakukan studi HAZOP berbasis model pada reaktor sintesis amonia menggunakan perangkat lunak simulasi Aspen HYSYS v8.4, dengan fokus pada berbagai fenomena kondisi mapan yang dapat memicu perubahan mendadak dan berbahaya dalam kondisi operasi. Studi ini dan studi oleh Labovský dan Jelemenský memiliki temuan umum bahwa penyimpangan suhu dan tekanan merupakan parameter dominan yang dapat menyebabkan kegagalan proses, namun perbedaan mendasar terletak pada pendekatan: studi ini menggunakan HAZOP konvensional, yang bersifat kualitatif dan manual, sedangkan Labovský dan Jelemenský menerapkan pendekatan berbasis model yang memanfaatkan simulasi matematis untuk memprediksi respons sistem terhadap penyimpangan, sehingga mengidentifikasi potensi bahaya yang mungkin terlewatkan oleh teknik konvensional. Pendekatan ini diakui sebagai alat yang lebih andal untuk analisis keselamatan proses, meskipun memerlukan tingkat keahlian data dan pemodelan yang lebih tinggi. (Cojocar & Pattabathula, 2023; J. Labovský & L. Jelemenský, 2015)

Perbandingan lebih lanjut dapat dilakukan dengan studi oleh Senu, Mohd Ariff, dan Abdul Razak (2020), yang mengembangkan pendekatan bow-tie dinamis yang menggabungkan HAZOP dengan jaringan Bayesian untuk analisis risiko dinamis reaktor amonia tiga tempat tidur berdasarkan proses tekanan ganda Uhde. Dalam studi tersebut, HAZOP digunakan sebagai alat untuk identifikasi bahaya

awal, diikuti oleh metode bow-tie untuk memodelkan hubungan sebab-akibat, dan jaringan Bayesian untuk memperbarui probabilitas risiko berdasarkan data kegagalan waktu nyata. Kesamaan mencolok antara penelitian ini dan studi oleh Senu dkk. adalah identifikasi bahwa kesalahan manusia, kegagalan kontrol proses, dan kegagalan penukar panas merupakan penyebab utama peningkatan tekanan yang cepat yang berisiko menyebabkan pecahnya bejana, serta bahwa sistem instrumentasi keselamatan seperti katup pelepas tekanan, interlock, dan alarm merupakan lapisan perlindungan yang kritis. Namun, studi ini berhenti pada tahap identifikasi bahaya dan rekomendasi kualitatif tanpa mengkuantifikasi probabilitas kegagalan, sedangkan Senu dkk. melangkah lebih jauh dengan menghitung probabilitas kegagalan dan membandingkannya dengan analisis pohon peristiwa, di mana pendekatan bow-tie dinamis terbukti lebih akurat. (Haswika et al., 2025; S. S. Senu et al., 2020)

Selain itu, sebuah studi yang diterbitkan dalam jurnal *Science & Technology Trends* pada tahun 2016 menerapkan HAZOP pada peralatan reaktor amonia dan menyimpulkan bahwa reaksi suhu tinggi, tekanan reaksi, dan kebocoran gas sintesis merupakan bahaya kritis yang harus dipantau. Studi tersebut memiliki kesamaan dengan penelitian ini dalam fokus utamanya pada penyimpangan suhu tinggi, karena suhu reaksi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan deaktivasi katalis, sementara kebocoran gas sintesis yang mengandung hidrogen dan nitrogen diakui sebagai bahaya utama karena sifat gas tersebut yang mudah terbakar dan beracun. Perbedaannya terletak pada cakupan node yang dianalisis: penelitian ini lebih luas, mencakup pemanas start-up, saluran masuk reaktor, unggun reaktor, dan saluran keluar reaktor, sedangkan penelitian dari Tiongkok tersebut Švandová, Jelemenský, dan Labovský (2019) mengembangkan perangkat lunak identifikasi bahaya berbasis simulasi untuk pabrik amonia, termasuk unit pemurnian gas sintesis dan rangkaian sintesis amonia. Mereka berhasil mengidentifikasi fenomena multiplisitas keadaan mapan dan menghasilkan laporan seperti HAZOP secara semi-otomatis. Kesamaan antara penelitian ini dan karya Švandová dkk. terletak pada pernyataan bahwa loop sintesis amonia merupakan area berisiko tinggi yang memerlukan analisis keselamatan yang cermat, serta perhatian terhadap fenomena multiplisitas keadaan tetap, yang juga menjadi fokus penelitian ini, meskipun tanpa simulasi matematis. Perbedaannya adalah bahwa penelitian ini mengandalkan analisis manual berdasarkan diagram alur proses (PFD) dan diskusi dengan tim teknis, sedangkan Švandová dkk. menggunakan mesin simulasi Aspen HYSYS untuk menghasilkan analisis semi-otomatis, sehingga prosesnya menjadi lebih efisien dan mampu menangani tingkat kompleksitas yang lebih tinggi. (Elhosary et al., 2024; Z. Švandová et al., 2019)

Akhirnya, Ma dkk. (2012) menggabungkan HAZOP dengan Analisis Pohon Gangguan (FTA) untuk mengidentifikasi bahaya di pabrik sintesis amonia. Studi tersebut memiliki kesamaan dengan penelitian ini dalam mengidentifikasi bahwa kegagalan dalam pengendalian suhu dan tekanan merupakan penyebab utama kecelakaan potensial, dan rekomendasi seperti pemasangan sistem interlock, sensor cadangan, dan katup keamanan muncul di kedua studi. Namun, Ma dkk. menggunakan FTA untuk memodelkan secara grafis hubungan logis antara penyebab utama dan peristiwa puncak (misalnya, ledakan reaktor), sehingga memungkinkan identifikasi jalur kegagalan yang paling kritis. Penelitian ini tidak menggunakan FTA, sehingga analisisnya lebih kualitatif dan tidak memetakan secara sistematis kontribusi relatif dari setiap penyebab utama. (Barbari et al., 2026; Z. G. Ma et al., 2012)

Singkatnya, studi ini memiliki kesamaan mendasar dengan berbagai studi HAZOP pada reaktor amonia lainnya, terutama terkait parameter kritis yang diidentifikasi (suhu, tekanan, dan aliran), penyebab utama penyimpangan (kegagalan kontrol proses, kegagalan instrumen, dan kesalahan operasional), konsekuensi terburuk (kerusakan katalis, kebocoran gas beracun/mudah terbakar, pecahnya bejana, dan ledakan), serta rekomendasi utama (sistem interlock yang ditingkatkan, sensor redundan, katup pengaman, dan pelatihan operator). Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan karena tidak menggunakan pendekatan berbasis model atau simulasi, tidak mengkuantifikasi probabilitas kegagalan, dan tidak menggabungkan HAZOP dengan metode kuantitatif lain seperti FTA, bow-tie, atau jaringan Bayesian, sehingga menghasilkan analisis yang bersifat kualitatif dan statis. Meskipun demikian, studi ini tetap memberikan kontribusi penting karena menyajikan analisis HAZOP yang sistematis dan terstruktur terhadap unit reaktor amonia di industri pupuk Indonesia, sebuah topik yang masih terbatas dalam literatur ilmiah; oleh karena itu, hasilnya dapat menjadi landasan untuk

pengembangan studi lanjutan yang mengintegrasikan pendekatan kuantitatif dan dinamis. tampaknya lebih berfokus pada reaktor secara keseluruhan tanpa merinci setiap node secara sistematis.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil Studi Bahaya dan Kelayakan Operasi (HAZOP) yang dilakukan pada proses produksi sintesis amonia di industri pupuk, khususnya pada unit reaktor, dapat disimpulkan bahwa terdapat sejumlah titik kritis yang berpotensi menyebabkan kecelakaan kerja jika tidak dikelola dengan sistem pengendalian yang memadai. Reaktor, sebagai inti dari proses sintesis amonia, beroperasi dalam kondisi tekanan dan suhu tinggi; oleh karena itu, setiap penyimpangan dari parameter operasi, baik dalam bentuk tekanan berlebih, suhu yang tidak terkendali, atau gangguan aliran bahan baku, dapat memicu insiden berbahaya seperti ledakan, kebocoran gas beracun, atau kerusakan peralatan. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa kegagalan pada sistem instrumentasi keselamatan, seperti katup pelepas tekanan, sistem interlock, dan sistem pemantauan suhu serta tekanan, merupakan kontributor utama terhadap tingkat risiko yang tinggi. Oleh karena itu, penerapan sistem pengendalian terintegrasi dan andal, dilengkapi dengan prosedur operasional standar dan pelatihan berkelanjutan bagi pekerja, sangat penting untuk memastikan keandalan proses sekaligus melindungi keselamatan pekerja dan lingkungan. Pendekatan HAZOP telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi potensi bahaya yang tidak terlihat dalam desain awal, sehingga rekomendasi perbaikan yang dihasilkan menjadi landasan penting bagi upaya pencegahan kecelakaan kerja yang sistematis dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Para penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada Institut Teknologi Nasional Bandung atas pendanaan penelitian yang sangat penting serta dukungan kelembagaan yang telah memungkinkan terselenggaranya penelitian ini. Ucapan terima kasih yang mendalam juga disampaikan kepada Dr. rer. nat. Riny Yolanda Parapat, S.T., M.T., M.Sc. atas bimbingan ilmiah yang tak ternilai, wawasan kritis, serta kontribusi intelektualnya selama proses penelitian dan penulisan makalah ini. Terima kasih khusus juga disampaikan kepada pihak industri atas kolaborasinya dalam memberikan akses ke lokasi penelitian, memfasilitasi lokasi pengukuran untuk pengumpulan data, serta mendukung penelitian lapangan yang diperlukan untuk pengembangan strategi manajemen risiko keselamatan kerja dalam produksi ammonia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ab Rahim, M. S., Reniers, G., Yang, M., & Bajpai, S. (2024). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 88, 105274. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274>
- Abbasi, A., Saberi, M., Rezaee, M. J., Eshkevari, M., & Porntaveetus, T. (2026). An Explainable AI-Driven Expert System for Risk Level Determination in Process Safety Using Sentiment Analysis: A HAZOP Study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 106085. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2026.106085>
- Abraham, J., Padmavathy, K. S., Haseena, P. V., & Ranjana, R. (2025). *Hazop and Hazid Analysis of Ammonia Barge Leaks* (pp. 434–440). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-922-3_28
- Barbari, Z., S. Meibodi, S., Narayanan, J. A., Mohtaram, S., Ja'fari, M., & Rezaei Gomari, S. (2026). A Critical Review of Risk Assessment and Control Strategies for Ammonia Storage and Handling in Maritime Decarbonisation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(12), 1124. <https://doi.org/10.3390/jmse14121124>
- Chaiprakarn, S., Sakulthaew, C., Ratcha, M., & Saengseedam, P. (2025). Occupational Chemical Exposure and Risk Assessment among Workers in Power Plant Process, Rayong Province, Thailand. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 14(1), 89–97. <https://doi.org/10.20473/ijosh.v14i1.2025.89-97>

- Cojocar, D., & Pattabathula, V. (2023). *A comprehensive review of hazards identification and risk assessment in ammonia plants Introduction: "Organizations have no memory"-Trevor Kletz.*
- Elhosary, E., Moselhi, O., & Bucur, C. (2024). Evaluation of AI-assisted HAZOP Software Tools. In *SYMPOSIUM SERIES* (Vol. 171).
- Gumelaringtyas, R., & Adriantantri, E. (2026). ANALISIS RISIKO KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA MENGGUNAKAN METODE HAZARD AND OPERABILITY STUDY (HAZOP) PADA PT. SNW. *Jurnal Valtech*, 9(1), 44–55. <https://doi.org/10.36040/valtech.v9i1.17734>
- Haswika, H., Auliana, W., Palabiran, M. A., & Pakiding, E. P. B. (2025). Integrasi FMEA dan Bow-Tie Analysis untuk Mitigasi Risiko Operasional pada Rantai Pasok Kopi. *Journal of Integrated System*, 8(2), 154–165. <https://doi.org/10.28932/jis.v8i2.13496>
- J. Labovský, & L. Jelemenský. (2015). Ammonia synthesis fundamentals for a model-based HAZOP study. *Acta Chimica Slovaca*, 8(1), 5–10.
- Jani, N., & Dalei, D. B. (2015). Safety Management System & Anhydrous Ammonia Safety. In *International Journal of Research and Technology (IJRT) International Open-Access, Peer-Reviewed, Refereed, Online Journal ISSN* (Vol. 9001). www.ijrt.org
- Kubra, K., & Soloman, P. A. (2025). Ammonia Synthesis Loop: A Dynamic Simulation-Based HAZOP Study. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 20(4). <https://doi.org/10.1002/apj.70034>
- Musyafa', A., Nuzula, Z. F., & Asy'ari, M. K. (2019). *Hazop evaluation and safety integrity level (SIL) analysis on steam system in ammonia plant Petrokimia Gresik Ltd.* 020029. <https://doi.org/10.1063/1.5095281>
- Nakyai, T., Phatrabuddha, S., Homsri, P., & Phatrabuddha, N. (2025). Risk assessment of ammonia leakage by fault tree analysis: Case study in the ice manufacture, Chonburi province. *F1000Research*, 14, 192. <https://doi.org/10.12688/f1000research.159905.1>
- Noriyati, R. D., Prakoso, A. B., Musyafa, A., & Soeprijanto, A. (2017). HAZOP Study and Determination of Safety Integrity Level Using Fault Tree Analysis on Fuel Gas Superheat Burner of Ammonia Unit in Petrochemical Plant, East Java. *Asian Journal of Applied Sciences*, 5(2). <https://doi.org/10.24203/ajas.v5i2.4683>
- P Sunilkumar, K., & P A, S. (2023). Ensuring Safety in Ammonia Production: A Comprehensive Hazard Analysis of the Reforming Section. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4507297>
- Roy, P. K., Bhatt, A., Kumar, B., Kaur, S., & Rajagopal, C. (2011). Consequence and risk assessment: Case study of an ammonia storage facility. *ARCH.ENVIRON*, 25–36.
- S. S. Senu, M. A. Mohd Ariff, & N. A. Abdul Razak. (2020). Dynamic risk analysis of chemical reactors using the dynamic bow-tie approach. In: 9th Virtual Science Invention Innovation Conference (SIIC). *Universiti Teknologi MARA*.
- Yusuf, W. N. (2026). *International Journal of Business and Quality Research Analysis Of An Organization's Operational Risk Management In The Identification, Evaluation, And Mitigation Of Risks.* <https://e-journal.citakonsultindo.or.id/index.php/IJBQR>
- Z. G. Ma, M. C. Jin, Y. T. Chen, X. N. Gao, & S. J. Tong. (2012). Application of HAZOP and fault tree analysis (FTA) in hazard identification of ammonia synthesis plant. *Journal of Safety Science and Technology*, 8(10), 1–85.
- Z. Švandová, L. Jelemenský, & J. Labovský. (2019). Software approach to simulation-based hazard identification of complex industrial processes. *Computers & Chemical Engineering*, 66–79.
- Zhang, H., Zhang, B., & Gao, D. (2023). A new approach of integrating industry prior knowledge for HAZOP interaction. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 82, 105005. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105005>