

Identifikasi Bahaya pada Unit Karbonasi dengan Metode *Hazard and Operability* (HAZOP) di Industri Produsen Pupuk

Senna Malik Ibrahim^{*}, Haidar Natsir Amrullah², Nora Amelia Novitrie³, Bona Dwijaya Sakti⁴

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

⁴Industri Produsen Pupuk, Gresik 61119

*E-mail: haidar.natsir@ppns.ac.id

Abstrak

Industri produsen pupuk merupakan perusahaan yang bergerak pada pembuatan pupuk dan bahan kimia. Salah satu produk pupuk yang dihasilkan adalah pupuk ZA/Ammonium Sulfat. Pupuk ZA diproduksi melalui beberapa tahapan seperti proses *carbonation, reaction, filtration, neutralization, evaporation, drying & cooling, bagging*. Pada tahap *carbonation* terjadi pereaksian antar reaktan seperti NH_3 , CO_2 , dan air menjadi *ammonium carbonate* ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) yang nantinya akan direaksikan dengan gypsum menjadi Ammonium Sulfat. Beberapa *equipment* yang digunakan seperti *Chiller E-5103, Carbonation Tower T-5101, Compressor C-5101*, pompa dll. Aktivitas produksi tersebut tentunya menimbulkan potensi bahaya seperti *over pressure, over heat*, maupun material *toxic* yang berpotensi release ke lingkungan sehingga dapat membahayakan pekerja, pencemaran lingkungan dan kerusakan peralatan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi bahaya dan penilaian risiko dengan metode *Hazard and Operability* (HAZOP) menggunakan standar IEC 61882 untuk mengetahui potensi bahaya dan konsekuensi dari menggabungkan antara *guideword* dan *process parameter* sehingga diketahui deviasi atau penyimpangan dari kondisi normal operasi. Hasil identifikasi menggunakan metode HAZOP pada unit karbonasi didapatkan total keseluruhan risiko pada manusia, asset, dan lingkungan yaitu sejumlah 151 risiko dengan kategori ekstrem 3 risiko (1,98 %), kategori high 17 risiko (11,2 %), kategori medium 105 risiko (69,53 %), kategori low 26 risiko (17,2 %). Beberapa rekomendasi yang dapat diberikan berdasarkan hirarki pengendalian bahaya seperti penambahan *Pressure Alarm High* (PAH) pada *Chiller E-5103*, melakukan program PPM (*Predictive, Preventive Maintenance*), dan pemberian *tag number* pada *valve*, dll.

Kata Kunci: Deviasi, Guideword, HAZOP, Unit Karbonasi

Abstract

The fertilizer manufacturing industry comprises companies engaged in the production of fertilizers and chemicals. One of the fertilizer products produced is ZA fertilizer/Ammonium Sulfate. ZA fertilizer is manufactured through several stages, such as *carbonation, reaction, filtration, neutralization, evaporation, drying & cooling, and bagging*. In the *carbonation* stage, a reaction occurs between reactants such as NH_3 , CO_2 , and water to form *ammonium carbonate* ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$), which will then be reacted with gypsum to produce Ammonium Sulfate. Several pieces of equipment are used, such as *Chiller E-5103, Carbonation Tower T-5101, Compressor C-5101, pumps, etc*. However, this production activity presents potential hazards such as *overpressure, overheating, and toxic materials* that may be released into the environment, posing risks to workers, environmental pollution, and equipment damage. This study aims to carry out hazard identification and risk assessment using the *Hazard and Operability* (HAZOP) method based on IEC 61882 standards to identify potential hazards and consequences by combining *guidewords* and *process parameters* to detect deviations from normal operating conditions. The HAZOP analysis of the *carbonation* unit identified a total of 151 risks, categorized as follows: 3 extreme risks (1.98%), 17 high risks (11.2%), 105 medium risks (69.53%), and 26 low risks (17.2%) on people, asset, and environment. Some recommendations based on the hazard control hierarchy include adding a *Pressure Alarm High* (PAH) on *Chiller E-5103*, implementing a PPM (*Predictive, Preventive Maintenance*) program, and tagging valves with tag numbers, etc.

Keywords: Carbonation Unit, Deviation, Guideword, HAZOP

1. PENDAHULUAN

Keselamatan proses merupakan aspek krusial dalam operasional industri, terutama pada sektor yang melibatkan bahan kimia berbahaya. Menurut *Major Accident Reporting System/MARS* dari Uni Eropa, kontributor major accident terbesar berasal dari industri manufaktur kimia, industri petrokimia, dan industri metalurgi, dengan

total masing-masing 295, 240, dan 70 kecelakaan besar (MARS, 2023). Industri produsen pupuk merupakan salah satu manufaktur pupuk terlengkap yang ada di Indonesia. Produk yang dihasilkan pada industri ini berupa produk pupuk dan non-pupuk. Produk pupuk yang dihasilkan seperti pupuk ZA, urea, Phonska, NPK, ZK, petroganik dan produk non-pupuk seperti ammonia, asam sulfat, asam fosfat, dan lainnya. Kapasitas keseluruhan jumlah produksi yang dihasilkan sebanyak 8,9 juta ton/tahunnya. aktivitas proses produksi pupuk tersebut tentunya melibatkan bahan kimia dan *equipment* yang berbahaya sehingga berpotensi menimbulkan kerugian minor hingga *catastrophic* bagi pekerja, fasilitas, dan lingkungan sehingga perlu adanya pengendalian. Berdasarkan standar OSHA 3132 (2000), salah satu elemen *Process Safety Management* yaitu melakukan penilaian bahaya pada bahan kimia berbahaya yang berpotensi *release* ke lingkungan.

Salah satu produk pupuk yaitu pupuk ZA/Ammonium Sulfat. Produksi pupuk ZA yaitu *Carbonation, Reaction, Filtration, Neutralizer, Evaporation, Drying & Cooling* dan *Bagging*. Tahap karbonasi terjadi reaksi antara ammonia (NH₃), CO₂, dan air membentuk Ammonium Carbonate ((NH₄)₂CO₃). Beberapa *equipment* seperti *Chiller E-5103, Ammonia Superheater E-5104, Carbonation Tower T-5101, Separator D-7301, Compressor C-5301, Cooler E-5101, Tanki TK-5103*, dan pompa. Ammonia liquid dengan suhu -30 °C dikenai kontak tidak langsung dengan air di cooling tower menjadi -10 s/d 1 °C lalu dipanaskan menggunakan Chiller E-5103 hingga mencapai 4 °C dan dipanaskan kembali dengan superheater E-5104 hingga suhu 27 °C berubah ke fase gas. CO₂ dalam fase gas dimasukkan kedalam *separator D-7301* untuk memisahkan liquid dan gas, CO₂ gas masuk kedalam *Compressor C-5101* untuk menaikkan tekanan hingga 1,2 kg/cm². Selanjutnya Ammonia, CO₂, dan Air direaksikan pada *Carbonation Tower T-5101* menjadi Ammonium Carbonate ((NH₄)₂CO₃) atau *Carbonation Liquor (CL)* dengan suhu 51 C dipompa menuju *Cooler E-5101* menjadi 40 C. CL selanjutnya disimpan pada TK-5103. Dari TK.5103 *Carbonation Liquor* dipompa dengan P.5102, untuk direaksikan dengan gypsum.

Proses operasional tersebut memiliki potensi bahaya yang muncul dari adanya penyimpangan/deviasi dari kondisi normal operasi seperti *over pressure, over heat* dapat menimbulkan risiko pada pekerja, asset, maupun lingkungan sekitar dari skala rendah hingga ekstrem. Salah satu metode yang digunakan untuk mengidentifikasi bahaya dari penyimpangan suatu kondisi normal yaitu *Hazard and Operability (HAZOP)*. Menurut Galante (2014), HAZOP merupakan metode analisis kualitatif yang dikembangkan untuk mengidentifikasi adanya risiko dan masalah operasional melalui dampak penyimpangan dari kondisi desain di pabrik proses industri. HAZOP merupakan salah satu teknik paling terstruktur untuk mempelajari bahaya dan masalah operabilitas, yang bertujuan mengeksplorasi dampak dari setiap penyimpangan terhadap kondisi desain dan operasional (Mocellin *et al.*, 2022). Kelemahan metode HAZOP yaitu proses sangat bergantung pada keahlian dari para rancangener yang mungkin merasa sulit untuk menjadi cukup obyektif (SNI, 2016). Pada penelitian yang dilakukan oleh Mahendra (2023), hasil identifikasi pada *methanator* didapatkan potensi penyimpangan bahaya memiliki 21 risiko tinggi dari 30 risiko yang terjadi.

Oleh karena itu, diperlukan adanya manajemen risiko meliputi identifikasi bahaya, penilaian risiko disertai dengan pengendalian bahaya pada unit Karbonasi untuk mengetahui potensi bahaya beserta dampak yang dihasilkan akibat adanya deviasi pada normal operasi menggunakan metode *Hazard and Operability (HAZOP)* sehingga diketahui tingkat risiko beserta pengendalian guna mewujudkan lingkungan kerja yang aman.

2. METODE

Manajemen Risiko

Manajemen risiko keselamatan adalah serangkaian tahapan untuk mengontrol risiko keselamatan dan kesehatan yang disebabkan oleh potensi bahaya di tempat kerja (Health and Safety Executive, 2024). Berdasarkan standar AS/NZS (2004) manajemen risiko adalah budaya, proses, dan struktur yang difokuskan untuk merealisasikan peluang yang ada serta mengelola risiko atau dampak negatif. Manajemen risiko merupakan Budaya, proses dan struktur yang bersatu untuk mengoptimalkan pengelolaan peluang potensial dan dampak buruk (Dave, 2016). Pada penilaian risiko meliputi tingkat besarnya kemungkinan suatu risiko terjadi (*likelihood*) dan tingkat keparahan yang ditimbulkan dari suatu risiko (*severity*) (Abryandoko, 2018). Nilai *likelihood* dan *severity* ditunjukkan dalam nilai rentang 1-5, semakin tinggi nilai *likelihood* atau *severity* semakin tinggi tingkat risiko. Kriteria *Likelihood* dapat dilihat pada **Tabel 1**. *Likelihood*.

Tabel 1. Likelihood

Nilai	Kriteria	Deskripsi	Waktu	Persentase
1	Sangat Jarang (<i>rare</i>)	Diketahui pernah terjadi dan kemungkinan terjadi kembali pada pekerjaan ini tidak dapat diprediksi.	> 10 Tahun	< 5 %
2	Jarang (<i>unlikely</i>)	Pernah terjadi lebih dari satu kali dan kemungkinan pengulangan kejadian jarang	Tiap 10 Tahun	5 % - 20 %
3	Mungkin (<i>Moderate</i>)	Pernah terjadi sesekali dan kemungkinan pengulangan kejadian dapat terjadi jika ada faktor lain atau faktor penyebab muncul.	Tiap 5 Tahun	20 % - 49 %

4	Mungkin Sekali (<i>likely</i>)	Diketahui terjadi secara reguler dalam industri dan kemungkinan pengulangan kejadian dapat diperkirakan terjadi.	Tahunan	50 % - 80 %
5	Hampir Pasti (<i>certain</i>)	Kemungkinan skenario terjadinya risiko sangat tinggi dalam pekerjaan kecuali diadakan perubahan	Bulanan	> 80 %

Sumber: Industri Produsen Pupuk, 2025

Sedangkan Severity dapat dibagi menjadi beberapa kategori antara lain yaitu manusia, aset, lingkungan, dan reputasi. Kriteria Severity dapat dilihat pada **Tabel 2**. Severity.

Tabel 2. Severity

Aspek	Nilai	Kriteria	Dampak
Manusia	1	<i>Insignificant</i>	Tidak ada cedera
	2	<i>Minor</i>	Gangguan kesehatan ringan
	3	<i>Moderate</i>	Gangguan kesehatan akut
	4	<i>Major</i>	Gangguan kesehatan kronis
	5	<i>Catastrophic</i>	Fatality/Cacat total tetap akibat PAK
Aset	1	<i>Insignificant</i>	Tidak signifikan (<10 jt)
	2	<i>Minor</i>	Kerusakan kecil (10 jt - 100 jt)
	3	<i>Moderate</i>	Kerusakan sedang (100 jt - 1 M)
	4	<i>Major</i>	Kerusakan besar (1 M - 20 M)
	5	<i>Catastrophic</i>	Kerusakan parah (> 20 M)
Lingkungan	1	<i>Insignificant</i>	Tidak ada paparan
	2	<i>Minor</i>	Paparan skala kecil
	3	<i>Moderate</i>	Paparan skala menengah
	4	<i>Major</i>	Paparan skala besar
	5	<i>Catastrophic</i>	Paparan skala bencana
Reputasi	1	<i>Insignificant</i>	Tidak Signifikan
	2	<i>Minor</i>	Lokal
	3	<i>Moderate</i>	Skala Regional
	4	<i>Major</i>	Skala Nasional
	5	<i>Catastrophic</i>	Skala Internasional

Sumber: Industri Produsen Pupuk, 2025

Besarnya nilai risiko didapatkan dari perkalian antara *likelihood* dan *severity*. Nilai risiko ditunjukkan pada **Tabel 3** risk matriks. Sedangkan risiko dikategorikan menjadi 4 kategori yaitu *low*, *medium*, *high*, dan *ekstrem*.

Tabel 3. Matriks Risiko

Deskripsi		Dampak				
		Tidak Signifikan	Kecil	Sedang	Besar	Bencana
Kemungkinan	Hampir Pasti	M	H	H	E	E
	Mungkin Sekali	L	M	H	H	E
	Mungkin	L	M	M	H	H
	Jarang	L	L	M	M	H
	Sangat Jarang	L	L	L	L	M

Sumber : Industri Produsen Pupuk, 2025

Setelah dilakukan penilaian risiko, dapat dilakukan pengendalian risiko terutama pada risiko yang terkategori unacceptable. Pengendalian risiko adalah kegiatan yang dilakukan berurutan agar mengurangi risiko yang ada (Aruan et al., 2021). Hirarki pengendalian memiliki lima tingkat tindakan untuk mengurangi atau menghilangkan bahaya yaitu eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, administrasi, dan penggunaan APD (NIOSH, 2024).

Metode Hazard and Operability (HAZOP)

HAZOP adalah metode penilaian bahaya yang sistematis dan komprehensif, yang bertujuan untuk mengidentifikasi potensi permasalahan yang dapat mengganggu jalannya proses serta risiko pada peralatan yang berpotensi menimbulkan bahaya bagi manusia maupun fasilitas dalam suatu sistem (Rahmanto et al., 2022). Pengerjaan HAZOP dapat dilakukan dengan standar BSI IEC 61882 *Application Guide*. Umumnya langkah pengerjaan HAZOP dapat dibagi menjadi empat tahapan yaitu tahap definisi, persiapan, penilaian, dan dokumentasi (BSI IEC., 2001).

a. Tahap Definisi

Pada tahap awal pelaksanaan HAZOP, *study leader* menetapkan cakupan objek yang akan dianalisis. Selain itu, *study leader* menentukan anggota tim yang akan terlibat dalam workshop HAZOP, di mana peran masing-masing anggota disesuaikan dengan kompetensi individu.

b. Tahap Persiapan/*Preparation*

Pada tahap persiapan yaitu memperkirakan waktu yang dibutuhkan, serta mengumpulkan berbagai informasi yang dibutuhkan pada saat pengerjaan HAZOP seperti deskripsi desain (deskripsi proses, *piping and instrumentation diagram*, *chemical properties/MSDS*, *engineering drawing*, prosedur kerja.

Tabel 1. Guide word

Guide word	Keterangan
NO OR NOT	<i>Complete negation of the design intent</i>
MORE	<i>Quantitative increase</i>
LESS	<i>Quantitative decrease</i>
AS WELL AS	<i>Qualitative modification/increase</i>
PART OF	<i>Qualitative modification/decrease</i>
REVERSE	<i>Logical opposite of the design intent</i>
OTHER THAN	<i>Complete substitution</i>
WHERE ELSE	<i>Applies to flows, transfers, sources and destinations</i>
BEFORE/AFTER	<i>Relates to order of sequence</i>
EARLY/LATE	<i>The timing is different from intention</i>
FASTER/SLOWER	<i>The step is done faster or slower than the intended timing</i>

Sumber: BSI IEC, 2001

c. Tahap Penilaian/*Examination*

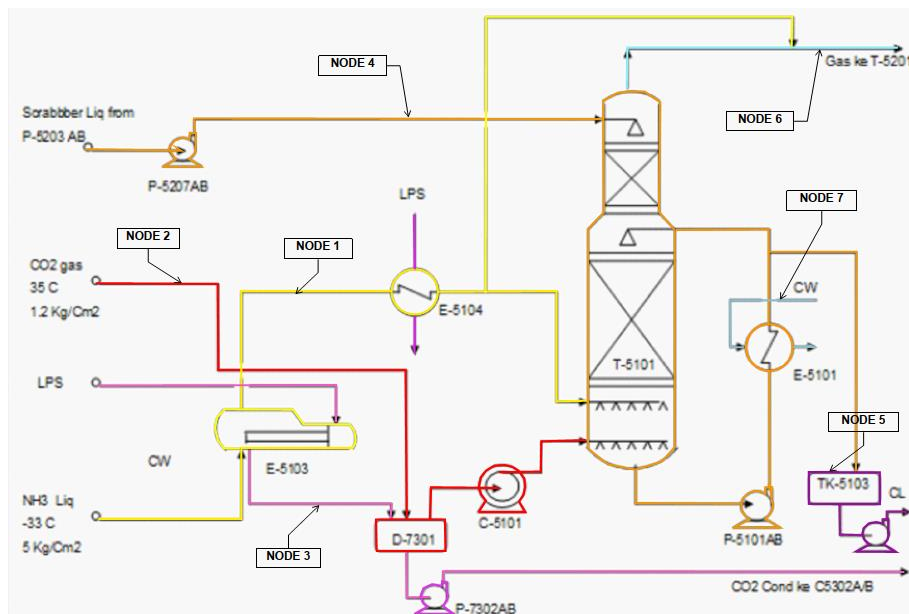
Pada tahap penilaian, *study leader* membagi sistem kedalam beberapa bagian atau *study nodes* beserta dengan *design intent* yaitu deskripsi cara kerja pada saat operasi normal pada masing-masing nodes. Selanjutnya yaitu mengidentifikasi potensi bahaya melalui adanya penyimpangan pada sistem dengan mengkombinasikan antara *guidewords* dengan parameter proses. Setelah itu, mengidentifikasi kemungkinan penyebab/causes dan dampak/consequences. *Consequences* dapat dikategorikan menjadi manusia, lingkungan, asset, dan reputasi. Mengidentifikasi existing safeguards dan menentukan recommendation.

d. Dokumentasi

Dokumentasi menjadi tahap penutup dalam proses HAZOP. Tahapan ini mencakup pencatatan hasil evaluasi HAZOP, penyusunan laporan, tindak lanjut atas tindakan yang telah diambil, kaji ulang hasil HAZOP, serta pelaporan secara keseluruhan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan identifikasi bahaya pada unit karbonasi menggunakan metode *Hazard and Operability* (HAZOP), didapatkan pada unit karbonasi terdapat 7 *study nodes* yang dapat dilihat pada Gambar 1 Penetapan *study nodes* dilakukan berdasarkan fungsi dari masing-masing equipment dan valve sebagai pemisah antar masing-masing *nodes* (Penelas *et al.*, 2021).

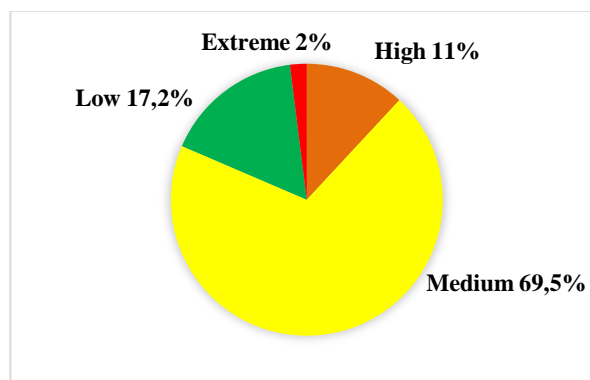


Gambar 1. Process Flow Diagram dengan Study Nodes
Sumber : Industri Produsen Pupuk, 2025

Keterangan Study Nodes :

- Node 1 : Transfer liquid Ammonia dari Ammonia feed pump P7301 dan Pemanasan pada Ammonia HE E-5103 dari -33 °C ke 5 °C & Superheater E-5104 5 °C ke 28 °C, merubah fase ammonia (liquid) menjadi (gas).
- Node 2 : Transfer CO₂ gas ke Separator D7301 untuk memisahkan fase liquid dan gas dan menaikkan tekanan gas CO₂ hingga 1,2 kg/cm² pada Compressor C-5101
- Node 3 : Memanaskan ammonia pada Chiller E-5103 dan Ammonia Superheater E-5104 menggunakan low pressure steam dan memompa condensate dari separator ke vacuum pump
- Node 4 : Pereaksian antara Ammonia gas, CO₂ gas, Scrubber liquor (H₂O) pada Carbonation Tower (T5101) menjadi Ammonium Carbonate (NH₄)₂CO₃ atau Carbonation Liquor (CL) dan memompa produk CL ke Carbonation Cooler (E5101) untuk mendinginkan dari suhu 51 C ke 40 C
- Node 5 : Penyimpanan CL pada Tanki TK-5103 dan dipompa ke unit reaksi 5200
- Node 6 : Gas exhaust dari carbonation tower ke section T.5201 ke T-5201
- Node 7 : Cooling water untuk mendinginkan CL pada E-5101

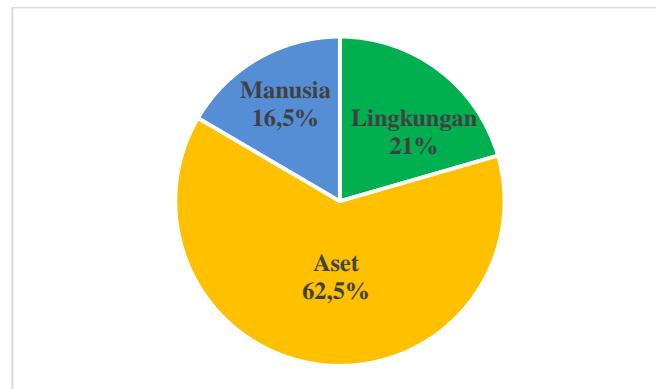
Dari hasil identifikasi menggunakan metode HAZOP, diperoleh total 151 risiko dengan kategori ekstrem 3 risiko (1,98 %), kategori high 17 risiko (11,2 %), kategori medium 105 risiko (69,53 %), kategori low 26 risiko (17,2 %). Persentase klasifikasi tingkat risiko tersebut ditampilkan dalam diagram pie pada **Gambar 2**. Persentase Berdasarkan Tingkat Risiko.



Gambar 2. Persentase Berdasarkan Tingkat Risiko

Adapun persentase klasifikasi risiko berdasarkan kategori menunjukkan bahwa terdapat 25 kategori manusia (16,5%), 94 kategori aset (62,25 %), 32 kategori lingkungan (21,2 %). Rincian distribusi risiko ini ditampilkan

pada diagram pie **Gambar 3**. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar risiko berasal dari kategori aset.



Gambar 3. Persentase Berdasarkan Kategori

Salah satu hasil dari Identifikasi HAZOP dapat dilihat pada **Tabel 2**. Cuplikan Hasil HAZOP. Beberapa rekomendasi pengendalian yang dapat dilakukan antara lain melakukan program PPM (*Predictive, Preventive Maintenance*) pada beberapa existing safeguard, pemberian tag number pada valve, pemberian Pressure Alarm High (PAH) pada Chiller E-5103 untuk memberikan peringatan pada operator, dan Pressure Switch High High (PSHH) pada Separator -7301 untuk mencegah terjadinya liquid carryover dari separator ke Compressor C-5301 agar Compressor trip apabila level condensate pada separator tinggi.

Tabel 2. Cuplikan HAZOP

HAZARD & OPERABILITY STUDY (HAZOP)																		
UNIT KABRBONASI																		
Company Name		Industri Produsen Pupuk																
Facility		-																
Node		Node - 02																
Node Description		Transfer CO2 ke Separator D7301 untuk memisahkan fase liquid dan gas dan menaikkan tekanan gas CO2 hingga 1,2 kg/cm2 pada Compressor C-5101																
Design and Operating Conditions		Separator (D7301) DP/OP : 2 kg/cm2.g/(0,3 - 0,5) kg/cm2.g ; DT/OT : 45 °C/40 °C ; DF/OF: 12,2 ton/jam/12,2 ton/jam CO2 Gas Compressor (C5101) DP suction/OP suction : 0,3 kg/cm2.g/0,3 kg/cm2.g ; DP discharge/OP discharge : 1,2 kg/cm2.g/1,2 kg/cm2.g ; DT/OT : 30 °C/40 - 50 °C ; DF/OF: - ton/jam/12,1 ton/jam, Capacity 7200 Nm3/jam																
Drawings		(Drawing Number : P-12-50-01/02111678)																
Deviation	Cause	Consequences	Consequence Category	Initial Risk			Safeguard	Risk Ranking			Recommendation/ Comment							
				S	L	R		Risk Ranking	S	L		R	Risk Ranking					
01. Flow																		
1.1	No Flow	1.1.1	HC-5101 Tertutup (Malfunction Closed)	1.1.1.1	Tidak ada supply CO2 menuju Compressor C5101 berpotensi overheat, vibrasi dan meledak mengakibatkan kerusakan aset pada kompresor sehingga Plant Shutdown dan potential fatality	Aset	4	3	12	High	1.	PIA 5106 L, LL With Operator Action	4	1	4	Low	1.	Program PPM (Check HC-5101 dapat beroperasi dengan baik)
						Manusia	5	4	20	Extreme	2.	PALL-5106 Compressor trip 5103	5	1	5	Medium	2.	Pemberian Tag Number pada Valve
											3.	XAHH Compressor Vibrasi					3.	Evaluasi kecukupan safeguard pada LOPA
											4.	Valve Bypass HC-5101						
5.	Antisurging prevention system																	
1.1.1.2	Tidak ada supply CO2 menuju Carbonation Tower berpotensi kegagalan reaksi keagagalan reaksi Carbonation Liquor (CL) sehingga mengakibatkan Plant Shutdown	Aset	3	2	6	Medium	1.	Valve Bypass HC-5101	3	1	3	Low	1.	Program PPM (Check PIA dapat beroperasi dengan baik)				
							2.	PIA 5106 L, LL With Operator Action					2.	Pemberian Tag Number pada Valve				

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil identifikasi bahaya dan penilaian risiko pada unit karbonasi didapatkan total keseluruhan risiko pada manusia, asset, dan lingkungan yaitu sejumlah 151 risiko dengan kategori ekstrem 3 risiko (1,98 %), kategori high 17 risiko (11,2 %), kategori medium 105 risiko (69,53 %), kategori low 26 risiko (17,2 %). Tindakan rekomendasi pengendalian yang dapat dilakukan seperti melakukan program PPM (Predictive, Preventive, dan Maintenance) pada safeguard existing yang terdapat pada equipment agar menjaga keandalan saat dibutuhkan, Pressure Alarm High (PAH) pada Chiller E-5103 untuk memberitahukan kepada operator mencegah dari over pressure, dan Level Switch High High (LSHH) pada Separator D-73101 untuk mencegah kerusakan Compressor C-5301 dari liquid carryover condensate Separator.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kontribusi dalam penyusunan paper penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abryandoko, E.W. (2018) 'Penilaian Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja Dengan Menggunakan Metode HIRARC', *Jurnal Rekayasa Sipil*, 12(1), pp. 50–57.
- Aruan, K.M.N. and Singgih, M.L. (2021) 'Pengendalian Risiko Kecelakaan HSSE pada Proses Pembuatan Pipa Baja', *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), pp. 52–57. Available at: <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.62628>.
- AS/NZS (2004) 'Risk Management Guidelines Companion to AS/NZS 4360:2004', *Nursing Management*, 10(5), pp. 31–31. Available at: <https://www.standards.govt.nz/>.
- British Standards Institution. (2001) *Hazard and operability studies (HAZOP studies) : application guide*.
- Dave, M. (2016) 'Practical HAZOP, Trips, and Alarm', pp. 1–23.
- Galante, E., Costa, D.M.B. da and Nóbrega, M. (2014) 'Risk Assessment Methodology: Quantitative HazOp', *Journal of Safety Engineering*, 3(2), p. 8. Available at: <https://doi.org/10.5923/j.safety.20140302.01>.
- Health and Safety Executive (2024) *Managing risks and risk assessment at work*, HSE GOV UK. Available at: <https://www.hse.gov.uk/simple-health-safety/risk/steps-needed-to-manage-risk.htm> (Accessed: 29 September 2024).
- Mahendra (2023) *Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko pada Methanator 106-D dengan Metode Hazard and Operability pada Perusahaan Pupuk*. 7th edn. Surabaya: CONFERENCE ON SAFETY ENGINEERING AND IT'S APPLICATION.
- MARS (2023) *Major Accident, European Commission*. Available at: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/statistics/statistics> (Accessed: 20 June 2025).
- Mocellin, P. et al. (2022) 'Experimental methods in chemical engineering: Hazard and operability analysis—HAZOP', *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 100(12), pp. 3450–3469. Available at: <https://doi.org/10.1002/cjce.24520>.
- NIOSH (2024) *About Hierarchy of Controls, United States Government*. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/hierarchy-of-controls/about/index.html>.
- OSHA (2000) *OSHA 3132 Process Safety Management, U.S. Department of Labor*. United States: U.S. Department of Labor. Available at: <https://doi.org/10.1201/b11720-11>.
- Penelas, A. de J. and Pires, J.C.M. (2021) 'Hazop analysis in terms of safety operations processes for oil production units: A case study', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21). Available at: <https://doi.org/10.3390/app112110210>.
- Rahmanto, I. and Ihsan Hamdy, M. (2022) 'Analisa Resiko Kecelakaan Kerja Karyawan Menggunakan Metode Hazard and Operability (HAZOP) di PT PJB Services PLTU Tembilahan', *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 1(2), pp. 53–60. Available at: <https://doi.org/10.55826/tmit.v1i2.15>.
- SNI (2016) 'Manajemen risiko – Teknik penilaian risiko Risk management – Risk assessment techniques', *Manajemen risiko*, p. 187.