

ANALISIS KESELAMATAN UNTUK MENCEGAH KECELAKAAN PADA PROSES EVAPORASI DI INSTALASI ELEMEN BAKAR EKSPERIMENTAL DENGAN METODE HAZOPS

SAFETY ANALYSIS TO PREVENT ACCIDENTS IN THE EVAPORATION PROCESS AT EXPERIMENTAL FUEL ELEMENT INSTALLATION WITH THE HAZOPS METHOD

Putra Oktavianto¹, Noor Anis Kundari², Ade Saputra¹, Imam Abdurrosyid¹, Andri Saputra^{3,*}

¹Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif-ORTN BRIN, Serpong, Indonesia

²Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia-BRIN, Yogyakarta, Indonesia

³Politeknik ATK Yogyakarta, Jalan ATEKA, Bangunharjo, Sewon, Bantul, Yogyakarta, Indonesia

*E-mail korespondensi: andri.saputra@atk.ac.id

Diterima 27 Maret 2023, diterima dalam bentuk perbaikan 8 Juli 2023, disetujui 20 Juli 2023

ABSTRAK

ANALISIS KESELAMATAN UNTUK MENCEGAH KECELAKAAN PADA PROSES EVAPORASI DI INSTALASI ELEMEN BAKAR EKSPERIMENTAL DENGAN METODE HAZOPS. Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) DPFK-BRIN telah menerapkan standar keselamatan sebagai acuan keselamatan menggunakan Hazard Identification Risk Assessment Determining Control (HIRADC). Metode HIRADC mempunyai beberapa kekurangan sehingga dalam penerapannya masih belum maksimal. Dalam penelitian ini, sebagai pelengkap metode HIRADC, maka analisis risiko dilakukan menggunakan Hazard and Operability Study (HAZOPS). Identifikasi bahaya dilakukan pada proses evaporasi larutan uranyl nitrat di tangki evaporator E-601. Metode HAZOPS dilakukan berdasarkan diagram proses dan instrumentasi (P&ID) untuk menentukan potensi bahaya yang mungkin terjadi selama proses evaporasi. Metode ini dilakukan dengan menentukan titik kajian (node) dan parameter, menganalisis penyimpangan atau potensi bahaya dari setiap node, melakukan analisis kemungkinan penyebab penyimpangan dan konsekuensinya, menentukan skala likelihood, menentukan tingkat risiko dan membuat rekomendasi. Berdasarkan penilaian yang telah dilakukan, didapatkan 6 node dan menghasilkan 11 penyimpangan yang disebabkan oleh 13 kerusakan atau kegagalan peralatan. Penilaian risiko terhadap 13 kerusakan menghasilkan 1 potensi risiko bahaya rendah dan 12 potensi risiko bahaya sedang. Kategori risiko bahaya rendah dapat diatasi dengan penanganan rutin seperti melakukan pemeliharaan preventif dan kalibrasi alat secara berkala. Untuk kategori risiko bahaya sedang, memerlukan rekomendasi seperti bahaya rendah dan rekomendasi lain dalam mengatasi penyimpangan yang mungkin terjadi sesuai dengan jenis penyimpangannya. Menurut hasil analisis keselamatan, dapat disimpulkan bahwa HAZOPS dapat melengkapi HIRADC untuk memastikan keselamatan terjaga saat dilakukan proses.

Kata kunci: HIRADC, HAZOPS, Proses Evaporasi, Uranyl Nitrat, Evaporator E-601

ABSTRACT

SAFETY ANALYSIS TO PREVENT ACCIDENTS IN THE EVAPORATION PROCESS AT EXPERIMENTAL FUEL ELEMENT INSTALLATION WITH THE HAZOPS METHOD. The Experimental Fuel Element Installation (IEBE) DPFK-BRIN has implemented safety standards as a safety reference using Hazard Identification Risk Assessment Determining Control (HIRADC). The HIRADC method has several lacks, so its application is not optimal. In this study, as a complement to the HIRADC method, a risk analysis was carried out using the Hazard and Operability Study (HAZOPS). The hazard identification was carried out during the evaporation process of the uranyl nitrate solution in the E-601 evaporator tank. The HAZOPS method is based on process and instrumentation diagrams (P&ID) to determine the potential hazards during evaporation. It is carried out by determining the nodes and parameters, analyzing deviations from each node or the potential danger of each node, the possible causes of deviations and their consequences, determining the likelihood scale and the level of risk, and making recommendations. Based on the assessment, six nodes were obtained, resulting in 11 deviations caused by 13 equipment malfunctions or failures. The risk assessment of 13 damages resulted in 1 potential low-hazard risk and 12 potential medium-hazard risks. The low-hazard risk category can be overcome by routine handling, such as preventive maintenance and regular equipment calibration. For the medium-hazard risk category, recommendations such as those for the low-hazard risk category and others are necessary to overcome deviations that may occur according to deviation type. According to safety assessment results, it can be concluded that HAZOPS can complement HIRADC to ensure safety is maintained during the process.

Keywords: HIRADC, HAZOPS, Evaporation Process, Uranyl Nitrate, Evaporator E-601

PENDAHULUAN

Saat ini fasilitas nuklir pemurnian dan konversi uranium merupakan bagian dari Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) milik DPFK BRIN telah menerapkan standar keselamatan sebagai acuan keselamatan operasi di fasilitas nuklir di BRIN yaitu SB 006-1-BATAN:2019 yang dalam penerapannya menggunakan *Hazard Identification Risk Assessment Determining Control* (HIRADC). Metode HIRADC mempunyai beberapa kelebihan antara lain penilaian terhadap kombinasi dari tingkat kemungkinan, *severity* (keparahan), tindakan pengendalian yang dilakukan, dan analisis risikonya meluas hingga keselamatan di area perkantoran. Selain itu, penggunaan metode HIRADC pada tahapan proses suatu alat serta analisis risiko lebih mudah dipahami. Akan tetapi, HIRADC mempunyai beberapa kekurangan antara lain kurang fokus dalam menganalisis risiko di satu alat/proses, data kurang menyeluruh karena analisis hanya pada tahapan proses dan tidak dapat digunakan untuk membuat rekomendasi modifikasi dalam suatu proses yang menyangkut sistem kontrol alat. Sebagai pelengkap dari acuan yang sudah ada maka dalam penelitian ini dilakukan analisis risiko menggunakan metode lain yaitu *Hazard and Operability Study* (HAZOPS). Metode HAZOPS adalah standar teknik analisis bahaya yang digunakan dalam persiapan penetapan keamanan dalam suatu sistem baru atau modifikasi untuk mengidentifikasi potensi bahaya atau masalah operabilitas sistem yang dapat terjadi saat pabrik dalam kondisi *start-up*, normal, maupun *shut-down* [1]. Selain itu, HAZOPS juga merupakan analisis sistematis dari suatu proses atau prosedur yang digunakan untuk mendefinisikan dan menilai masalah yang dapat menyebabkan risiko bagi operator atau peralatan atau operasi yang efisien dan merupakan metode kualitatif berdasarkan kata-kata panduan (*guidewords*) [2]. Metode HAZOPS sendiri memiliki beberapa kelebihan antara lain metode ini disusun secara sistematis dan juga fleksibel dari sebelum sistem produksi beroperasi sehingga metode ini bisa memodifikasi suatu peralatan yang sudah ada agar masalah dalam pengoperasian bisa berkurang terutama masalah sistem kontrol alat. Selain itu, metode ini juga bisa mengidentifikasi penyebab setiap penyimpangan yang terjadi karena metode ini berfokus pada keamanan, pencegahan kecelakaan, dan peningkatan kelancaran suatu proses. Metode HAZOPS juga tidak membutuhkan biaya besar, metode yang sistematis, komprehensif, mudah digunakan, lebih sederhana dan intuitif [3]. Metode HAZOPS juga mempunyai beberapa kekurangan antara lain membutuhkan waktu yang lama, tidak efektif jika bertemu dengan penyimpangan ganda atau ada dua atau lebih penyimpangan pada satu proses atau peralatan, dan cenderung tidak memperhatikan kerusakan dan tingkat keparahan. Berdasarkan kelebihan dan kekurangan metode HIRADC dan HAZOPS tersebut, maka penulis menggunakan metode HAZOPS pada fasilitas pemurnian dan konversi uranium sehingga bisa menjadi rekomendasi modifikasi untuk meningkatkan keselamatan.

Metode HAZOPS merupakan salah satu metode *Process Hazard Analysis* (PHA) atau analisis bahaya proses yang paling umum digunakan di seluruh dunia untuk mengidentifikasi bahaya dan dipandang oleh banyak praktisi sebagai metode yang paling menyeluruh dan lengkap karena tidak hanya menganalisis bahaya suatu sistem, tetapi juga masalah operabilitasnya dengan menganalisis setiap efek penyimpangan dari kondisi desain [4]. Metode ini juga ditunjuk sebagai metode PHA yang dapat diterima oleh peraturan di seluruh dunia, seperti *the Occupational Health and Safety Assessment Series* (OHSAS's) dan *Process Safety Management* (PSM) *standard* [5]. Konsep HAZOP dibangun pada awal tahun 1970-an oleh *Imperial Chemical Industries* (ICI) yang berbasis di Inggris. Pada tahun 1974 dalam artikel yang ditulis Lawley menggambarkan prinsip-prinsip yang diperlukan untuk menyelesaikan analisis atau HAZOPS [6]. Pada tahun 1977 Asosiasi Industri Kimia di Inggris menerbitkan pedoman pertama HAZOPS sebagai metode yang direkomendasikan dalam industri proses untuk mengidentifikasi bahaya dan merencanakan tindakan keselamatan. Pada tahun-tahun berikutnya, perbaikan telah dilakukan dalam prosedur HAZOPS, pada dasarnya tetap hampir sama dalam bentuk dan konteks sistem ICI yang asli [7].

Beberapa publikasi melaporkan penerapan studi HAZOP yang diterapkan di industri kimia untuk mengurangi risiko keselamatan, antara lain dilaporkan oleh Marhaviilas dkk pada tahun 2019 yang menggabungkan HAZOPS dengan pengambilan keputusan multi kriteria teknik pembuatan di *Sour-Crude-Oil-Industry*. Proses berfokus pada penyimpangan yang berdampak pada ekonomi, kesehatan, dan lingkungan [8]. Jae-Young Choi dan Sang-Hoon Byeon pada tahun 2020 juga telah melaporkan hasil studi HAZOP yang diterapkan pada pabrik *Solution Styrene Butadiene Rubber* (SBBR) diharapkan dapat mengurangi risiko kesehatan, keselamatan, dan lingkungan [9]. Fasilitas pemurnian dan konversi uranium yang berada di IEBE terdiri dari beberapa alat utama pada beberapa proses agar serbuk uranium dioksida (UO₂) berderajat nuklir dapat diperoleh dengan urutan proses pelarutan yellow cake, pemurnian, pemekatan, pengendapan, pengeringan, dan kalsinasi-reduksi. Pada penelitian ini diharapkan potensi bahaya dalam proses evaporasi dapat diketahui sehingga bisa dilakukan suatu tindakan mitigasi risiko berupa penanggulangan kedaruratan nuklir yang diakibatkan oleh kecelakaan saat pengoperasian alat pada proses evaporasi fasilitas pemurnian dan konversi uranium. Selain uranium merupakan bahan radioaktif, fasilitas pemurnian dan konversi uranium juga menggunakan bahan kimia lainnya yang sangat korosif maupun eksplosif seperti asam nitrat, tributil fosfat (TBP), *kerosene*, amoniak, gas LPG dan gas hidrogen [10].

Penelitian ini juga sebagai pelengkap metode HIRADC yang telah diterapkan pada fasilitas pemurnian dan konversi uranium yang berada di Instalasi IEBE. Dalam HIRADC lebih banyak menjelaskan keselamatan dalam pelaksanaan operasi di fasilitas ini dari sisi kesalahan manusia (operator) maupun kegagalan proses karena kerusakan pada alat, pengendalian dengan penggunaan alat pelindung diri (APD) oleh operator dan pengecekan ulang alat sebelum dioperasikan. Studi HAZOP dapat melengkapi sisi keselamatan di fasilitas menggunakan sistem kontrol indikator yang secara otomatis akan menghilangkan risiko bahaya yang terjadi saat pengoperasian fasilitas.

Proses evaporasi larutan uranil nitrat (UN) merupakan proses pemekatan larutan UN melalui proses penguapan kandungan air dalam larutan UN. Larutan UN yang telah dimurnikan harus dipekatkan terlebih dahulu sebelum proses pengendapan dilakukan karena untuk melakukan proses pengendapan harus dalam densitas yang besar. Larutan UN yang tertampung dalam tangki hasil pemurnian mengandung sedikit senyawa organik yang dapat terakumulasi dalam penguap dan dapat menimbulkan bahaya pada saat penguraian karena panas terhadap nitrasi produk organik dapat menyebabkan suatu reaksi yang sangat keras (*violence*). Reaksi ini hanya dapat terjadi pada suhu yang tinggi yaitu lebih dari 135°C, sehingga pengamanan terhadap pengukuran harus baik untuk menjaga suhu penguap tetap terkendali. Tekanan kerja uap panas (*steam*) pemanas diturunkan memakai katup pengontrol tekanan dan kemudian dijenuhkan dengan air bebas mineral (ABM) melalui indikator aliran, dibawah kondisi tersebut suhu tidak akan lebih dari 130°C. Adanya *valve* pada *inlet steam* untuk memastikan bahwa *steam* tidak akan memasuki sistem proses evaporasi jika *valve* ditutup. *Valve* ini dihubungkan dengan sensor suhu dalam tangki sehingga jika suhu dalam tangki mencapai suhu 130°C maka *valve* akan menutup dan aliran *steam* akan terputus [11]. Proses evaporasi berhubungan erat dengan suhu tinggi sehingga kemungkinan kecelakaan dapat terjadi pada proses ini. Oleh karena itu, diperlukan assesmen keselamatan dalam proses ini untuk menjaga baik operator maupun lingkungan dari bahaya kecelakaan yang mungkin terjadi.

METODOLOGI

Objek penelitian ini adalah tangki evaporator E-601. Larutan UN hasil proses pemurnian dari tangki V-404C dipompa menuju evaporator E-601. Dalam evaporator E-601, larutan UN dipanaskan oleh aliran uap panas (*steam*) sampai dengan suhu 130°C. Untuk memastikan kualitas dan keselamatan selama proses evaporasi berlangsung, beberapa perangkat kontrol seperti level, aliran, suhu, dan densitas dipasang pada evaporator E-601. Berdasarkan diagram proses dan instrumentasi (P&ID), analisis dilakukan dengan menggunakan metode HAZOPS untuk menentukan titik kajian, kata panduan, penyimpangan, kemungkinan penyebab, frekuensi *likelihood*, dan kemungkinan dampak.

Likelihood dievaluasi berdasarkan jumlah terjadinya bahaya. Frekuensi *likelihood* ini juga dapat dievaluasi berdasarkan data-data historis dari komponen yang sama atau dari kegagalan yang pernah terjadi pada komponen tersebut berdasarkan data *failure rate* (laju kegagalan). Laju kegagalan adalah jumlah kegagalan yang terjadi dibagi dengan total waktu operasi yang berlalu selama kegagalan terjadi atau jumlah total permintaan [12]. *Likelihood* ditentukan dengan menghitung *Mean Time to Failure* (MTTF) dari probabilitas suatu laju kegagalan yang akan terjadi dengan menggunakan persamaan (1) dan (2).

$$\lambda = \frac{\text{Jumlah total kegagalan}}{\text{Waktu total komponen}} \quad (1)$$

atau

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

dengan MTTF adalah *Mean Time to Failure* dan λ adalah *failure rate* (laju kegagalan).

Kerusakan alat dalam jangka waktu tertentu dapat dicari dengan membagi waktu operasi instrumen terhadap MTTF dengan persamaan (3).

$$\text{Frekuensi kerusakan (likelihood)} = \frac{\text{waktu operasi instrumen}}{\text{MTTF}} \quad (3)$$

Nilai level *likehood* dapat ditentukan berdasarkan deskripsi pada The Standard Australia/New Zealand (AS/NZS 4360:2004) seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Likelihood (*The Standard Australia/ New Zealand (AS/NZS 4360:2004)* [13])

Level	Kategori	Deskripsi	Frekuensi
5	Almost certain	Terjadi peristiwa setiap tahun	Setahun sekali atau lebih sering
4	Likely	Terjadi peristiwa beberapa kali atau lebih	Tiga tahun sekali
3	Possible	Mungkin peristiwa terjadi sekali	Setiap sepuluh tahun sekali
2	Unlikely	Terjadi peristiwa di suatu tempat dari waktu ke waktu	Setiap tiga puluh tahun sekali
1	Rare	Mendengar sesuatu peristiwa seperti yang terjadi di tempat lain	Setiap 100 tahun sekali

Level konsekuensi ditentukan pada deskripsi dalam *The Standard Australis/New Zealand (AS/NZS 4360:2004)* seperti disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Tabel level konsekuensi menurut AS/NZS 4360:2004 [13]

Level	Descriptor	Description
1	<i>Negligible</i>	Sistem beroperasi & aman, terjadi sedikit gangguan tidak berarti
2	<i>Minor</i>	Sistem tetap beroperasi & aman, gangguan mengakibatkan sedikit penurunan performasi atau kinerja sistem terganggu
3	<i>Moderate</i>	Sistem dapat beroperasi, kegagalan dapat mengakibatkan mesin kehilangan fungsi utamanya dan/ dapat menimbulkan kegagalan produk
4	<i>Major</i>	Sistem tidak dapat beroperasi. Kegagalan dapat menyebabkan terjadinya banyak kerusakan aset & sistem, dapat menimbulkan kegagalan produk, dan/ tidak memenuhi persyaratan peraturan Keselamatan Kerja
5	<i>Severe</i>	Sistem tidak layak operasi, keparahan yang sangat tinggi bila kegagalan mempengaruhi sistem yang aman, melanggar peraturan Keselamatan Kerja

Tingkat risiko dihitung dengan mengalikan nilai *likelihood* dan *consequence*, kemudian disesuaikan dengan matriks risiko berdasarkan *The Standards Australis/New Zealand (AS/NZS 4360:2004)* pada Tabel 3.

Tabel 3. Tabel level konsekuensi menurut AS/NZS 4360:2004 [13]

Likelihood	Consequences Level				
	Negligible	Minor	Moderate	Major	Severe
	1	2	3	4	5
5 (<i>Almost certain</i>)	Medium M5	High H10	High H15	Very high E20	Very high E25
4 (<i>Likely</i>)	Medium M4	Medium M8	High H12	High H16	Very high E20
3 (<i>Possible</i>)	Low L3	Medium M6	High H9	High H12	High H15
2 (<i>Unlikely</i>)	Low L2	Low L4	Medium M6	Medium M8	High H10
1 (<i>Rare</i>)	Low L1	Low L2	Medium M3	Medium M4	High H5

Langkah-langkah mengidentifikasi bahaya dengan menggunakan metode HAZOP antara lain:

1. Mengkaji urutan proses pada objek penelitian, dengan memperhatikan P&ID.
2. Menentukan titik kajian dan mengidentifikasi *hazard* di sekitar titik kajian.
3. Melengkapi kriteria yang ada pada HAZOP *worksheet* dengan urutan sebagai berikut:
 - a. mengklasifikasikan *hazard* yang ditemukan (sumber *hazard* dan frekuensi temuan *hazard*);
 - b. mendeskripsikan *deviation* atau penyimpangan yang terjadi selama proses operasi;
 - c. mendeskripsikan penyebab terjadinya penyimpangan (*cause*);
 - d. mendeskripsikan kemungkinan dampak ditimbulkan dari penyimpangan tersebut (*consequences*);

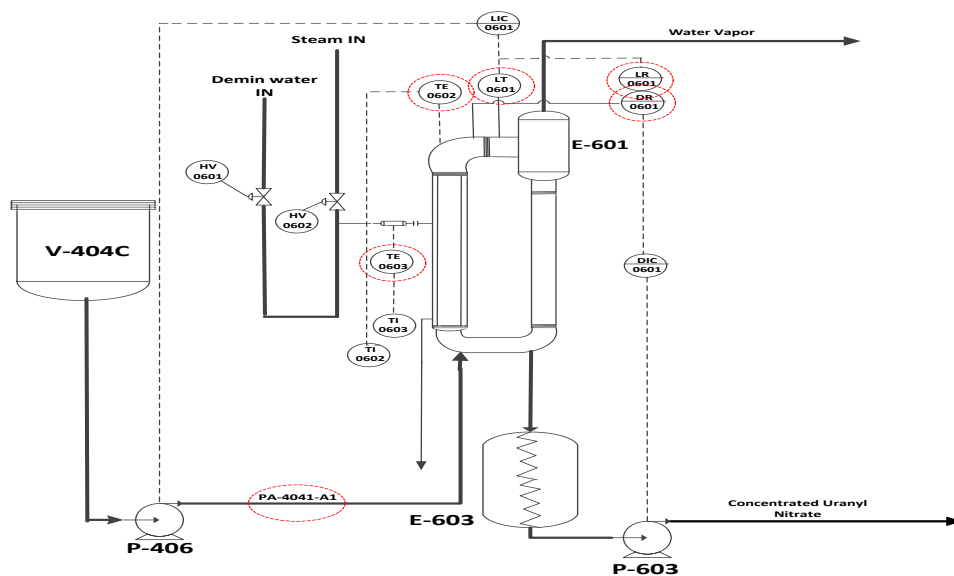
- e. menentukan tindakan sementara yang dapat dilakukan;
- f. menilai risiko (*risk assessment*) yang timbul dengan mendefinisikan kriteria *likelihood* dan *consequences* (*severity*). Kriteria *likelihood* yang digunakan adalah frekuensi dimana dalam perhitungannya secara kuantitatif berdasarkan data atau *record* perusahaan selama kurun waktu tertentu. Kriteria *consequences* (*severity*) yang digunakan adalah akibat yang ditimbulkan dan mempertimbangkan tingkat keparahan dampak;
- g. melakukan pemeringkatan dari *hazard* yang telah diidentifikasi menggunakan HAZOP *worksheet* dengan memperhitungkan *likelihood* dan *consequence*, kemudian menggunakan *risk matrix* untuk mengetahui prioritas *hazard* yang harus diberi prioritas untuk diperbaiki; dan
- h. merancang perbaikan untuk risiko yang memiliki level "Ekstrim", kemudian merumuskan rekomendasi untuk perbaikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi potensi bahaya dengan menggunakan metode HAZOPS perlu melakukan beberapa langkah. Berikut uraian hasil dan pembahasan langkah-langkah yang telah dilakukan.

Penentuan Titik Kajian (*Node*) dan Parameter

Penentuan *node* pada evaporator E-601 didasarkan pada setiap bagian alat yang berhubungan langsung dan berpengaruh pada proses. *Node* digabungkan dengan parameter proses yang sesuai. Pengendalian risiko keselamatan proses sangat erat kaitannya dengan sistem instrumentasi yang terpasang. Oleh karena itu, untuk mendapatkan titik kajiannya, maka perlu dibuat diagram proses instrumentasi (P&ID). Diagram proses instrumentasi proses evaporasi pada evaporator E-601 larutan UN disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Proses Instrumentasi (P&ID) pada Evaporator E-601 [14]

Berdasarkan P&ID pada Gambar 1, dipilih 6 *node* berikut parameter yang berpengaruh pada evaporator E-601 seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Node dan Parameter pada Evaporator E-601

No.	Node	Kode	Parameter
1	Temperature Element	TE-0602	Temperatur
2	Temperature Element	TE-0603	Temperatur
3	Density Recorder	DR-0601	Sinyal
4	Level Transmitter	LT-0601	Level
5	Level Recorder	LR-0601	Sinyal
6	Anorganic Phase Pipeline	PA-4041-A1	Aliran

Analisis Penyimpangan atau Potensi Bahaya dari Setiap Node

Setelah mendapatkan *node* dan parameter pada evaporator E-601, dilanjutkan dengan analisis potensi bahaya yang mungkin terjadi pada setiap *node* dan konsekuensi atau risiko yang timbul. Potensi bahaya dapat diidentifikasi berdasarkan penyimpangan kondisi operasi yang telah ditentukan oleh *guideword* dan dinyatakan sebagai deviasi. Selanjutnya, hasil kombinasi parameter setiap *node* dengan *guideword* yang sesuai dapat digunakan untuk menentukan konsekuensi atau risikonya.

Pada *node temperature element* (TE-0602), kombinasi parameter dengan *guideword less* dan *more* menghasilkan penyimpangan temperatur larutan UN di dalam evaporator E-601 kurang dari 100°C dan lebih dari 100°C. Pada TE-0602, kombinasi parameter temperatur dengan *guideword less* dan *more* menghasilkan penyimpangan temperatur *steam* yang masuk evaporator E-601 kurang dari 120°C dan lebih dari 120°C. Pada *node density recorder* (DR-0601), kombinasi parameter sinyal dengan *guideword early* dan *later* menghasilkan penyimpangan sinyal densitas yang ditangkap lebih cepat dari densitas fluida dalam evaporator E-601 dan sinyal densitas yang ditangkap lebih lambat dari kondisi densitas yang sebenarnya dalam evaporator E-601. Pada *node level transmitter* (LT-0601), kombinasi parameter level dengan *guideword less* dan *more* menghasilkan penyimpangan level larutan uranil nitrat di dalam evaporator E-601 kurang dari 20% dan level larutan UN di dalam evaporator E-601 lebih dari 80%. Pada *node level recorder* (LR-0302), kombinasi parameter sinyal dengan *guideword early* dan *later* menghasilkan penyimpangan sinyal level yang dikirim dari transmitter lebih lambat dari kondisi level sebenarnya dalam tangki pelarutan DI-301. Pada *node anorganic phase pipeline* (PA-4041-A1), kombinasi parameter aliran dan *guideword no* menghasilkan penyimpangan tidak ada aliran umpan uranil nitrat yang masuk ke dalam evaporator E-601.

Analisis Kemungkinan Penyebab Penyimpangan dan Konsekuensinya

Berdasarkan penyimpangan yang didapatkan pada setiap *node*, kemudian ditentukan kemungkinan penyebab terjadinya penyimpangan tersebut dan kemungkinan dampak (konsekuensi) yang terjadi akibat terjadinya penyimpangan tersebut beserta level konsekuensinya. Level konsekuensi dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil analisis penyebab dan konsekuensi dari setiap *node* pada tangki pelarutan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Penyebab dan Konsekuensi Penyimpangan pada Evaporator E-601

Node	Penyimpangan	Penyebab	Konsekuensi	Level Konsekuensi
Temperature element (TE-0602)	Temperatur larutan UN di dalam evaporator E-601 kurang dari 100°C	Valve HV-0602 macet tidak bisa terbuka dan kerusakan Temperature Element (TE-0602)	Kandungan air dalam larutan UN tidak dapat menguap sehingga menyebabkan produk masih mengandung banyak air (kegagalan produk), akan tetapi sistem tetap dapat beroperasi	3
	Temperatur larutan UN di dalam evaporator E-601 lebih dari 120°C	Valve HV-0601 macet tidak bisa terbuka dan kerusakan Temperature Element (TE-0602)	Larutan UN menjadi sangat kental sehingga bisa menyumbat pipa yang dapat menyebabkan sistem tidak dapat beroperasi dan menimbulkan kegagalan produk	4
Temperature element (TE-0603)	Temperatur <i>steam</i> yang masuk evaporator E-601 kurang dari 120°C	Kerusakan Temperature Element (TE-0603)	Pemanasan larutan UN tidak mencapai temperatur yang cukup untuk menguapkan kandungan air dalam larutan UN sehingga menyebabkan produk masih mengandung banyak air (kegagalan produk), akan tetapi sistem tetap dapat beroperasi	3

Node	Penyimpangan	Penyebab	Konsekuensi	Level Konsekuensi
	Temperatur <i>steam</i> yang masuk evaporator E-601 lebih dari 130°C	Kerusakan <i>Temperature Element</i> (TE-0603)	Larutan UN menjadi sangat kental sehingga dapat menyumbat pipa yang dapat menyebabkan sistem tidak dapat beroperasi dan menimbulkan kegagalan produk	4
Density Recorder (DR-0601)	Sinyal densitas yang ditangkap lebih cepat dari kondisi yang sebenarnya	Kerusakan <i>Density Recorder</i> (DR-0601)	Larutan UN yang dikirim ke tangki penampung hasil tidak sesuai standar sehingga terjadi kegagalan produk, akan tetapi sistem tetap dapat beroperasi	3
	Sinyal densitas yang ditangkap lebih lambat dari kondisi yang sebenarnya	Kerusakan <i>Density Recorder</i> (DR-0601)	Larutan UN menjadi sangat kental sehingga dapat menyumbat pipa yang dapat menyebabkan sistem tidak dapat beroperasi, menyebabkan terjadinya banyak kerusakan aset & sistem, menimbulkan kegagalan produk	4
Level Transmitter (LT-0601)	Level larutan UN di dalam evaporator E-601 kurang dari 20%	Kerusakan <i>Level Transmitter</i> (LT-0601)	Tekanan di dalam tangki naik akibat pemanasan yang terjadi dan dapat menyebabkan ledakan sehingga sistem tidak dapat beroperasi dan menimbulkan kegagalan produk	4
	Level larutan UN di dalam evaporator E-601 lebih dari 80%	Kerusakan <i>Level Transmitter</i> (LT-0601)	Terjadi <i>overflow</i> dimana larutannya juga merupakan zat radioaktif sehingga bisa menyebabkan kontaminasi dan paparan radiasi internal, akan tetapi sistem tetap beroperasi & aman, gangguan hanya mengakibatkan kinerja sistem terganggu	2
Level Recorder (LR-0601)	Sinyal level yang ditangkap lebih cepat dari kondisi level yang sebenarnya	Kerusakan <i>Level Recorder</i> (LR-0601)	Terjadi salah pembacaan level yang dapat menyebabkan ledakan sehingga sistem tidak dapat berfungsi seperti biasanya dan menimbulkan kegagalan produk	4
	Sinyal level yang ditangkap lebih lambat dari kondisi level yang sebenarnya	Kerusakan <i>Level Recorder</i> (LR-0601)	Bisa menyebabkan bahaya seperti <i>overflow</i> karena salah pembacaan level dan dengan terjadinya <i>overflow</i> bisa menyebabkan kontaminasi dan paparan radiasi internal karena larutan berupa zat radioaktif. Akan tetapi, sistem tetap beroperasi & aman, gangguan hanya mengakibatkan kinerja sistem terganggu	2
Anorganic Phase Pipeline (PA-4041-A1)	Tidak ada aliran umpan UN yang masuk ke dalam evaporator E-601	Kerusakan <i>dosing control</i> pompa P-406 (macet tidak bisa dibuka)	Tidak ada umpan yang dipanaskan dan bisa terjadi kenaikan tekanan karena pemanasan dapat menyebabkan ledakan sehingga sistem tidak dapat beroperasi dan menimbulkan kegagalan produk	4

Menentukan Skala *Likelihood*

Likelihood adalah ukuran frekuensi kemungkinan terjadinya suatu peristiwa atau insiden dan dinyatakan dalam probabilitas kejadian dalam interval waktu tertentu [15]. Skala *likelihood* ditentukan berdasarkan MTTF peralatan yang diperoleh dari *database* keandalan dan *database* literatur. *Database* keandalan diperoleh dari data tahunan proses instalasi dan pemeliharaan, sedangkan *database* literatur diperoleh dari data sekunder seperti data dari OREDA. Nilai MTTF didapatkan dari seperi nilai *failure rate* alat yang dikonversi menjadi nilai *reability* (λ). Nilai MTTF dapat digunakan untuk mencari level sesuai dengan kriteria pada tabel *likelihood*. Level *likelihood* dapat ditentukan dengan mengetahui frekuensi kerusakan peralatan dalam kurun waktu tertentu. Jika digunakan asumsi

bahwa peralatan beroperasi 8 jam per hari atau 2880 jam per tahun, maka waktu operasi alat (2880 jam) dibagi dengan nilai MTTF didapatkan nilai *likelihood* dalam 1 tahun. Perhitungan yang sama dilakukan lagi untuk jangka waktu 3 tahun, 10 tahun, 30 tahun dan 100 tahun. Berdasarkan nilai *likelihood* yang diperoleh, maka dapat diketahui tingkat *likelihood* dari setiap kerusakan alat yang terjadi. Jika nilai *likelihood* yang mencapai nilai 1 pertama kali muncul, dapat dipastikan bahwa pada tahun tersebut merupakan frekuensi kemungkinan terjadinya kecelakaan akibat kerusakan alat. Selanjutnya dilakukan penentuan tingkat *likelihood* menggunakan Tabel 1. Hasil analisis penyebab dan konsekuensi dari setiap *node* pada tangki pelarutan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Penentuan Nilai dan Level *Likelihood*

Node	Kemungkinan Penyebab	Failure Rate (Per 106 jam)	λ	MTTF (1/ λ)	Nilai <i>Likelihood</i> tiap Periode (Tahun)					Level
					1	3	10	30	100	
Temperature Element (TE-0602)	Valve HV-0602 macet tidak bisa terbuka	0,18	$1,8 \times 10^{-7}$	5.555.555	0,0005	0,0016	0,0052	0,016	0,052	1
	Valve HV-0601 macet tidak bisa terbuka	0,18	$1,8 \times 10^{-7}$	5.555.555	0,0005	0,0016	0,0052	0,016	0,052	1
	Kerusakan Temperature Element (TE-0602)	8,00	8×10^{-6}	5.555.555	125.000	0,023	0,2304	0,691	2,304	2
Temperature Element (TE-0602)	Kerusakan Temperature Element (TE-0603)	8,00	8×10^{-6}	5.555.555	125.000	0,023	0,2304	0,691	2,304	2
	Kerusakan Temperature Element (TE-0603)	8,00	8×10^{-6}	5.555.555	125.000	0,023	0,2304	0,691	2,304	2
Density Recorder (DR-0601)	Kerusakan Density Recorder (DR-0601)	1,00	$1,0 \times 10^{-6}$	1.000.000	0,0029	0,0086	0,0288	0,086	0,288	1
	Kerusakan Density Recorder (DR-0601)	1,00	$1,0 \times 10^{-6}$	1.000.000	0,0029	0,0086	0,0288	0,086	0,288	1
Level Recorder (LR-0601)	Kerusakan Level Trasmmitter (LT-0601)	1,72	$1,7 \times 10^{-6}$	581.395	0,0049	0,0149	0,0495	0,149	0,495	1
	Kerusakan Level Trasmmitter (LT-0601)	1,72	$1,7 \times 10^{-6}$	581.395	0,0049	0,0149	0,0495	0,149	0,495	1
Level Recorder (LR-0601)	Kerusakan Level Recorder (LR-0601)	8,98	$8,9 \times 10^{-6}$	111.358	0,0259	0,0776	0,259	0,776	2,586	2
	Kerusakan Level Recorder (LR-0601)	8,98	$8,9 \times 10^{-6}$	111.358	0,0259	0,0776	0,259	0,776	2,586	2
Anorganic Phase Pipeline (PA-4041-A1)	Kerusakan dosing control pompa P-406 (macet tidak bisa dibuka)	0,12	$1,2 \times 10^{-7}$	8.333.333	0,0004	0,0010	0,0035	0,010	0,035	1

Menentukan Tingkat Risiko dan Membuat Rekomendasi

Ranking risiko ditentukan dengan memperhitungkan nilai konsekuensi dan *likelihood* yang telah diperoleh dengan menggunakan tabel matriks risiko pada Tabel 3 untuk menentukan tingkat risiko. Setelah nilai tingkat risiko diketahui, selanjutnya dilakukan penilaian terhadap setiap penyimpangan untuk menyusun rekomendasi pengendalian agar potensi bahaya yang telah diprediksi dapat dihindari atau dihilangkan. Tabel 7 menyajikan penilaian risiko dan rekomendasi yang diperlukan berdasarkan nilai tingkat risiko yang telah diperoleh.

Tabel 7. Hasil Penilaian Risiko dan Rekomendasi pada Evaporator E-601

Node	Penyebab	L	C	Tingkat Risiko	Rekomendasi
Temperature element (TE-0602)	Valve HV-0602 macet tidak bisa terbuka	1	3	M3 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu Pemasangan pipa dan <i>valve</i> tambahan secara paralel sebagai <i>back up valve</i> jika terjadi kerusakan
	Kegagalan Temperature Element (TE-0602)	2	3	M6 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu Pemasangan alarm TAL (<i>temperature alarm low</i>) yang akan berbunyi saat temperaturnya kurang dari temperatur operasi
	Valve HV-0601 macet tidak bisa terbuka	1	4	M4 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu Pemasangan pipa dan <i>valve</i> tambahan secara paralel sebagai <i>back up valve</i> jika terjadi kerusakan
	Kegagalan Temperature Element (TE-0602)	2	4	M8 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu
	Valve HV-0602 macet tidak bisa terbuka	1	3	M3 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu Pemasangan pipa dan <i>valve</i> tambahan secara paralel sebagai <i>back up valve</i> jika terjadi kerusakan
Temperature element (TE-0603)	Kerusakan Temperature element (TE-0603)	2	3	M6 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu Pemasangan alarm TAL (<i>temperature alarm low</i>) yang akan berbunyi saat temperaturnya kurang dari temperatur operasi
	Kerusakan Temperature element (TE-0603)	2	4	M6 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu
Density Recorder (DR-0601)	Kerusakan Density Recorder (DR-0601)	1	3	M3 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu
	Kerusakan Density Recorder (DR-0601)	1	4	M4 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu Pemasangan alarm DAL (<i>density alarm low</i>) yang akan berbunyi saat densitasnya kurang dari densitas yang diinginkan (1,27 kg/L)
Level Trasmmitter (LT-0601)	Kerusakan Level Trasmmitter (LT-0601)	1	4	M4 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu Pemasangan alarm DAL (<i>density</i> pemasangan alarm sebagai pembaca awal level untuk memberikan peringatan adanya penyimpangan saat level larutan dalam tangki di bawah 20%)
	Kerusakan Level Trasmmitter (LT-0601)	1	2	M2 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu
Level Recorder (LR-0601)	Kerusakan Level Recorder (LR-0601)	2	4	M8 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu Pemasangan alarm DAL (<i>density</i> pemasangan alarm sebagai pembaca awal level untuk memberikan peringatan adanya penyimpangan saat level larutan dalam tangki di bawah 20%)
	Kerusakan Level Recorder (LR-0601)	2	2	M4 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu

Node	Penyebab	L	C	Tingkat Risiko	Rekomendasi
Anorganic Phase Pipeline (PA-4041-A1)	Kerusakan dosing control pompa P-406 (macet tidak bisa dibuka)	1	4	M4 (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibrasi alat dan <i>preventive maintenance</i> secara berkala dalam periode waktu tertentu • Pemasangan pompa tambahan seperti pada pompa P-401 A/B yang bisa secara bergantian digunakan apabila salah satunya mengalami kerusakan atau dalam proses perbaikan

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil identifikasi dan analisis menggunakan studi HAZOP pada evaporator E-601 proses evaporasi larutan UN di fasilitas pemurnian dan konversi uranium dari identifikasi 6 node diperoleh 11 potensi bahaya yang disebabkan oleh 13 kerusakan dan atau kegagalan peralatan. Penilaian risiko dari 13 kerusakan tersebut terdapat 1 potensi bahaya yang termasuk dalam kategori risiko rendah (*low risk*) dan 12 potensi bahaya yang termasuk dalam kategori risiko sedang (*medium risk*). Rekomendasi untuk kategori risiko bahaya rendah dengan melakukan penanganan secara rutin seperti perawatan preventif berkala dan kalibrasi alat dalam kurun waktu tertentu atau ketika ditemukan penyimpangan. Rekomendasi untuk kategori risiko bahaya sedang selain rekomendasi seperti kategori risiko bahaya rendah juga perlu rekomendasi lain dalam mengatasi penyimpangan yang terjadi sesuai dengan jenis penyimpangannya. Berdasarkan hasil assessment keselamatan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan juga bahwa HAZOPS dapat melengkapi HIRADC untuk memastikan keselamatan terjaga saat dilakukan proses.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada koordinator kelompok penelitian teknologi bahan bakar nuklir Ibu Ratih Langenati serta kepada seluruh rekan-rekan IEBE yang telah membantu kelancaran kegiatan ini dan juga Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia yang telah memberikan dukungan dalam penulisan dan publikasi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Musyafa and H. Adiyagsa, "Hazard and Operability study in Boiler System of The Steam Power Plant," *Int. J. Sci. Technol. (IJSTE)*, vol. 1, no. 3, pp. 1–10, 2012.
- [2] C. Holloway, Michael and Nwaoha, *Dictionary of Industrial Terms*. 2013.
- [3] B. Suhardi, P. W. Laksono, A. A. V E, J. M. Rohani, and T. S. Ching, "Analysis of the Potential Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA) and Hazard Operability Study (HAZOP): Case Study," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, pp. 1–7, 2018.
- [4] J. Dunjó, V. Fthenakis, J. A. Vilchez, and J. Arnaldos, "Hazard and operability (HAZOP) analysis . A literature review," *J. Hazard. Mater. J.*, vol. 173, pp. 19–32, 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.076.
- [5] P. Baybutt, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries A critique of the Hazard and Operability (HAZOP) study," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 33, pp. 52–58, 2015, doi: 10.1016/j.jlp.2014.11.010.
- [6] H. G. Lawley, "Operability Studies and Hazard Analysis," *Chem. Eng. Prog.*, 1974.
- [7] S. . Khan, F.I and Abbasi, "Risk Assessment In Chemical Process Industries." Discovery Publ. House, New Delhi, 1998.
- [8] P. K. Marhavalas, M. Filippidis, G. K. Koulinas, and D. E. Koulouriotis, "The integration of HAZOP study with risk-matrix and the analytical-hierarchy process for identifying critical control-points and prioritizing risks in industry – A case study," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 62, p. 103981, 2019, doi: 10.1016/j.jlp.2019.103981.
- [9] J. Y. Choi and S. H. Byeon, "Hazop methodology based on the health, safety, and environment engineering," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 9, 2020, doi: 10.3390/ijerph17093236.
- [10] A. Muchsin, "PELATIHAN PENYEGARAN OPERATOR DAN SUPERVISOR 2018." PUSDIKLAT BATAN, Serpong, 2018.
- [11] I. Setiawan and N. Yudhi, "Optimalisasi Proses Pemekatan Larutan Unh Pada Seksi 600 Pilot Conversion Plant," *Optim. Proses Pemekatan Larutan UNH Pada Seksi 600 Pilot Convers. Plant (Iwan Setiawan, Noor Yudhi)*, vol. 15, no. 8, pp. 9–16, 2015.

- [12] G. Sciver, "Guidelines for process equipment reliability data," *J. Hazard. Mater.*, vol. 26, no. 1, p. 102, 1991, doi: 10.1016/0304-3894(91)85022-f.
- [13] J. Whitfield, "AS/NZS 43600 SET Risk Management Set," *Nature*, vol. 428, no. 6983, 2004.
- [14] NIRA, "Process Flow Sheet in Evaporation Process." Italy, 1983.
- [15] N. Hyatt, *Guidelines for Process Hazards Analysis , Hazards Identification & Risk Analysis*. 2003.