

PENETAPAN PRIORITAS PEMELIHARAAN FASILITAS EVAPORATOR LIMBAH RADIOAKTIF CAIR MELALUI STUDI HAZOP DAN FAILURE RATE

Arie Budianti^{1*}, Dadan Erwandi², M. Romli³

Departemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia^{1,2}, Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran BRIN³

*Corresponding Author : airesalsabila@gmail.com

ABSTRAK

Risiko keselamatan dari operasi suatu fasilitas dapat terjadi dari adanya penuaan dari komponen/unit/sistem. Program pemeliharaan termasuk di dalamnya tindakan perbaikan dari komponen/unit/sistem merupakan tindakan pencegahan dan pengendalian dari risiko yang dapat terjadi. Namun tidak semua tindakan pencegahan dan/atau pengendalian dapat dilakukan karena adanya keterbatasan anggaran. Demikian pula kondisi yang terjadi di IPLR DPFK BRIN yang memiliki unit evaporasi untuk pengolahan limbah cair radioaktif yang sudah beroperasi sejak tahun 1989. Studi ini bertujuan untuk mendapatkan prioritas pemeliharaan berdasarkan potensi bahaya yang dapat terjadi dari kegagalan suatu komponen dalam unit evaporasi. Metode yang digunakan adalah dengan mengkuantifikasi hasil studi HAZOP dari system evaporasi dengan menggunakan skala konsekuensi dari SB 06-01 : 2019 tentang Penilaian Risiko K3 di BATAN serta perhitungan failure rate. Hasil studi menunjukkan bahwa V22071 adalah komponen yang harus diprioritaskan dalam program pemeliharaan, untuk menjamin keberlangsungan pengolahan limbah cair radioaktif dengan evaporator secara selamat.

Kata kunci : failure rate, HAZOP , pemeliharaan

ABSTRACT

Safety risks from facility operation could result from components/units/systems ageing. A maintenance program that includes corrective actions for components/units/systems is part of preventive and control measures against risks that may occur. However, not all preventive and/or control measures can be taken due to budget constraints. It is also experienced by IPLR DPFK BRIN, which has an evaporation unit for liquid radioactive waste treatment that has been operating since 1989. This study aims to obtain maintenance priority based on hazard potential which may arise from the component failure of the evaporation system by quantifying the result of evaporation's HAZOP study using the scale of consequences based on SB 06-01: 2019 and failure rate calculation. The result of this study shows that components should be prioritized in the maintenance program to ensure sustainability and safety of liquid radioactive waste treatment, is V22071.

Keywords : failure rate, HAZOP, maintenance

PENDAHULUAN

Limbah merupakan produk samping yang menyertai dalam suatu kegiatan produksi barang maupun jasa, demikian pula dalam kegiatan penelitian, pengembangan, pengkajian dan penerapan teknologi nuklir. Pengelolaan limbah radioaktif yang merupakan upaya pengumpulan, pengelompokan, pengolahan, pengangkutan, penyimpanan, dan/atau pembuangan limbah radioaktif, menjadi salah satu aspek yang sangat diperhatikan dalam pemanfaatan teknologi nuklir (Tochaikul et al., 2022). Pemanfaatan zat radioaktif maupun fasilitas radiasi atau bahan nuklir perlu mengajukan perizinan dan harus melampirkan rencana pengelolaan limbah radioaktif maupun bahan nuklirnya (Agency, 2010). UU Republik Indonesia no 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran mengamanatkan kepada setiap pemegang izin untuk mengelola limbah yang dihasilkan sebelum dikirim kepada Badan Pelaksana yaitu Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif (IPLR)-Direktorat Pengelolaan

Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK)-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). IPLR-DPFK merupakan bagian dari badan pelaksana pengelolaan limbah radioaktif yang memiliki unit pengolah limbah radioaktif salah satunya adalah unit evaporator.

Unit evaporator berfungsi untuk mengolah limbah radioaktif jenis cair yang memiliki karakteristik kadar garam tinggi. Pengolahan dilakukan dengan mereduksi volume limbah cair dengan metode evaporasi untuk mendapatkan konsentrat limbah radioaktif yang selanjutnya akan dikungkung dengan matriks beton untuk memastikan zat radioaktif tidak mudah terlepas ke lingkungan (RADIOAKTIF, 2017). Unit tersebut dibangun sejak tahun 1989 dan mulai beroperasi pada tahun 1990. Masa pengoperasian unit yang sudah cukup lama selama lebih dari 32 tahun memerlukan perhatian khusus karena telah mengalami penuaan dan meningkatkan risiko terjadinya degradasi material (Håbrekke et al., 2011).

Menurut Peraturan Kepala BAPETEN No 7 tahun 2012, penuaan adalah proses perubahan karakteristik sistem struktur dan komponen (SSK) sebagai fungsi waktu dan/atau akibat pemanfaatan pada kondisi operasi yang menyebabkan degradasi material, dimana degradasi tersebut melalui mekanismenya dapat berupa erosi, korosi lingkungan, fatigue mekanik, fatigue panas dan lainnya (Bragatto & Milazzo, 2016). Penuaan berpotensi meningkatkan risiko terjadinya kegagalan fungsi, kegagalan pengungkungan dari material yang sedang diproses atau hal lain yang signifikan sehingga menjadi insiden atau kecelakaan (Bragatto & Milazzo, 2016). Sehingga hal tersebut harus menjadi pertimbangan saat pemutakhiran penilaian risiko (Håbrekke et al., 2011).

Pemutakhiran penilaian risiko merupakan suatu tahapan yang tidak dapat dikesampingkan (Health and Safety Executive, 2014) karena memungkinkan adanya perubahan kondisi fasilitas akibat kegiatan operasi, pemeliharaan maupun perbaikan. Tahapan dari penilaian risiko dalam pemutakhiran daftar risiko untuk melihat kesesuaian dengan kondisi fasilitas terkini tidak berbeda, hanya saja langkah identifikasi potensi risikonya dapat disesuaikan dengan karakteristik sumber bahaya yang akan diamati, sehingga potensi risiko bisa lebih terdali (Health and Safety Executive, 2014). Dalam dokumen teknis IAEA (2002) (Agency, 2002) salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis risiko keselamatan secara probabilistik pada fasilitas *non reactor* nuklir seperti unit pengolah limbah adalah studi *Hazard and Operability* (HAZOP).

Studi HAZOP menjadi salah satu pilihan alat untuk mengidentifikasi potensi bahaya ataupun kegagalan yang dapat dikombinasikan dengan metode identifikasi lain seperti *fault tree analysis* (FTA) (Kotek & Tabas, 2012) atau *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Studi tersebut dilakukan melalui *brainstorming* yang mengacu pada dokumen teknis fasilitas serta rekaman operasi dan pemeliharaan (Kotek & Tabas, 2012), juga melibatkan personil dengan latar belakang keterampilan, pengalaman yang bervariasi bertujuan untuk memberikan hasil yang lebih lengkap. Selain itu juga dilakukan dalam berbagai siklus fasilitas mulai dari fase konsep, desain, pembangunan, operasi dan pemeliharaan (Agency, 1993) hingga fase dekomisioning. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan prioritas pemeliharaan berdasarkan potensi bahaya yang dapat terjadi dari kegagalan suatu komponen dalam unit evaporasi dengan menggunakan pendekatan Studi HAZOP.

METODE

Desain dan jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian kuantitatif krosseksional yang dilakukan dari bulan Juni hingga November 2021. Data yang dihasilkan adalah data melalui *brainstorming* dan telaah dokumen HAZOP serta dokumen teknis dari unit evaporasi dengan melibatkan operator dengan latar belakang pengalaman dan keterampilan (Agency, 1993) dalam hal kelistrikan dan mekanik. Penggalan informasi dilakukan dengan mengacu pada kata bantu serta parameter pada titik yang sedang diamati

(node). Kata bantu dan parameter dikembangkan menjadi suatu deviasi yang mungkin terjadi untuk selanjutnya diidentifikasi kemungkinan penyebab dan akibat yang dapat terjadi.

Langkah kerja yang dilakukan dalam melakukan penetapan prioritas pemeliharaan meliputi identifikasi titik kritis melalui studi HAZOP, menghitung nilai *failure rate* dari titik kritis yang berhasil teridentifikasi, menghitung konversi *failure rate* menjadi rentang skala peluang 1-5 dengan menggunakan nilai median dari nilai *failure rate* yang diperoleh, memasukkan nilai peluang dan nilai konsekuensi untuk mendapatkan tingkat risiko. Tingkat risiko yang digunakan dalam penelitian ini mempertimbangkan dampak kejadian terhadap keselamatan pekerja, perkiraan dosis radiasi yang diterima oleh pekerja dan kerugian finansial apabila terjadi kerusakan aset. Prioritas pemeliharaan mengacu pada hasil dengan tingkat risiko tertinggi atau terparah.

Selain itu, menurut Shafagi A & Cook FB, (1988) studi HAZOP dapat juga dikombinasikan dengan tahap penilaian risiko (Kotek & Tabas, 2012) sehingga dapat diperoleh pemeringkatan risiko yang dapat membantu organisasi untuk menyusun prioritas tindakan pengendalian. Tidak jarang organisasi memiliki keterbatasan anggaran sedangkan daftar risiko yang memerlukan biaya untuk tindakan pengendalian jauh lebih banyak. Dalam hal ini, hasil studi HAZOP yang telah diperingkatkan akan membantu organisasi dalam menetapkan prioritas pengendalian, yang dalam kaitannya dengan penuaan fasilitas, prioritas pengendalian dapat berupa prioritas program pemeliharaan (Nguyen et al., 2022) komponen/unit/sistem, sehingga operasi fasilitas dapat tetap berjalan secara selamat. Lebih jauh lagi, implementasi studi HAZOP dan penilaian risiko dapat digunakan untuk mengembangkan skenario kecelakaan (Suzuki et al., 2021) yang selanjutnya digunakan untuk menyusun program kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan.

Identifikasi kegagalan dalam operasi unit atau sistem dengan studi HAZOP yang dilanjutkan dengan penilaian risiko kegagalan (Kotek & Tabas, 2012) dapat dihitung melalui nilai rerata tingkat kegagalan dan konsekuensi yang ditimbulkan dari kegagalan tersebut. Penetapan nilai peluang dan konsekuensi didasarkan pada rekaman operasi dan menggunakan standar skala yang berlaku di masing-masing organisasi. IPLR DPFK menggunakan menggunakan dokumen Standar BATAN 06-1-BATAN : 2019 mengenai Penilaian Risiko K3 (Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2019) dengan skala seperti pada Tabel 1, 2 dan 3. Standar tersebut mempertimbangkan jenis kegiatan apakah kegiatan rutin atau non rutin serta 3 macam konsekuensi yang mungkin terjadi di lingkungan BATAN yaitu (1) dampak terhadap personal, (2) penerimaan dosis radiasi personal dan (3) kerugian aset.

Tabel 1. Skala Peluang menurut SB 06-1-BATAN : 2019

Skala	Sifat Pekerjaan	
	Rutin	Non Rutin
1	Secara teori bisa terjadi, tetapi belum pernah mengalami atau pernah mendengar terjadi	Secara teori bisa terjadi, tetapi yakin tidak akan terjadi selama pekerjaan berlangsung
2	Pernah terjadi 1 (satu) kali pada suatu waktu yang tidak diketahui dengan pasti, di atas 5 (lima) tahun	Bisa terjadi tetapi sangat kecil kemungkinan akan terjadi, 1 (satu) kali selama pekerjaan berlangsung
3	Pernah terjadi dalam waktu 5 (lima) tahun terakhir	Bisa terjadi paling banyak 1 (satu) kali selama pekerjaan berlangsung
4	Pernah terjadi dalam waktu 3 (tiga) tahun terakhir	Bisa terjadi 2 (dua) sampai 3 (tiga) kali selama pekerjaan berlangsung
5	Pernah terjadi dalam waktu 1 (satu) tahun terakhir	Bisa terjadi lebih dari 3 (tiga) kali selama pekerjaan berlangsung

Tabel 2. Skala Konsekuensi menurut SB 06-1-BATAN : 2019

Skala	Dampak K3	Penerimaan dosis individu (<i>d</i>)	Kerugian finansial (<i>f</i>)
	K1	K2	K3
1	Tindakan P3K	$d < 25\%$ pembatas dosis unit kerja	$f < 5\%$
2	Perawatan medis	25% pembatas dosis unit kerja $< d < 50\%$ pembatas dosis unit kerja	$5\% < f < 15\%$
3	Cacat permanen 1 orang	50% pembatas dosis unit kerja $< d < 75\%$ pembatas dosis unit kerja	$15\% < f < 30\%$
4	Kematian 1 orang dan/atau cacat permanen > 1 orang	75% pembatas dosis unit kerja $< d < 20$ mSv	$30\% < f < 50\%$
5	Kematian lebih dari 1 orang	$d > 20$ mSv per tahun	$f > 50\%$

Tabel 3. Skala Risiko menurut SB 06-1-BATAN : 2019

Peringkat	Skala Risiko	Tindakan
A	1 - 5	Risiko dapat diterima, langkah pengendalian dinilai efektif
B	6 -10	Risiko dapat diterima, perlu dilakukan pengawasan/supervisi
C	11 - 15	Risiko berlum dapat diterima, perlu dilakukan tindakan pengendalian tambahan
D	16 - 20	Risiko tidak dapat diterima, harus dilakukan tindakan pengendalian yang diprioritaskan
E	21 - 25	Risiko sangat tidak dapat diterima, harus dilakukan tindakan pengendalian segera

Meskipun konsekuensi mempertimbangkan 3 aspek menjadi K1, K2 dan K3 seperti pada Tabel 2 di atas, konsekuensi yang digunakan dalam perhitungan risiko adalah konsekuensi dengan nilai yang tertinggi. Sebagai contoh apabila terdapat potensi limbah yang diolah mengandung *Tributyl Phosphate* (TBP) maka dapat menyebabkan ledakan. Dampak dari ledakan tersebut dapat menyebabkan pekerja terluka dan perlu mendapatkan perawatan di RS (K1 = 2), pekerja menerima dosis radiasi kurang dari 25% pembatas dosis radiasi yang berlaku (K2 = 1) dan kerusakan asset yang bernilai lebih dari 50% dari nilai asset tersebut (K3 = 5), maka nilai K yang akan digunakan dalam perhitungan risiko adalah K3 = 5. Nilai risiko dihitung dengan persamaan berikut :

$$R = P \times K_{\text{tertinggi}}$$

(Persamaan 1)

Dengan,

R = risiko

P = peluang

$K_{\text{tertinggi}}$ = nilai konsekuensi tertinggi

Setelah nilai risiko diperoleh, evaluasi dengan tingkat risiko pada tabel 3, apakah risiko dapat diterima atau perlu dilakukan tindakan pengendalian tambahan. Pada penelitian ini, untuk menghitung risiko K3 yang berbasis pada kegagalan fungsi struktur/sistem/komponen,

penulis menggunakan failure rate untuk menggantikan skala peluang pada tabel 1. menurut Coffelt dan Hendrickson (2021) (Donald Coffelt; Chris Hendrickson, 2021), *failure rate* adalah kemungkinan terjadinya kegagalan fungsi pada interval waktu berikutnya. merupakan kebalikan dari nilai *mean time between failures* (MTBF). MTBF adalah rata-rata interval waktu kerusakan yang terjadi dari sejak komponen selesai diperbaiki hingga rusak kembali (Fatma et al., 2020). Nilai MTBF dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$MTBF = \frac{\text{Total waktu operasi terjadwal} - \text{Total waktu yang hilang akibat kegagalan}}{\text{Frekuensi kegagalan}}$$

(Persamaan 2)

Sehingga *failure rate* dapat dihitung dengan persamaan :

$$\text{Failure rate} = \frac{1}{MTBF}$$

(Persamaan 3)

HASIL

Limbah cair radioaktif yang diolah di IPLR berasal dari kegiatan litbangjirap teknologi nuklir baik dari unit kerja di BRIN maupun dari institusi luar BRIN. Tidak semua limbah radioaktif cair diolah dengan metode evaporasi. Pemilihan metode pengolahan limbah radioaktif disesuaikan dengan karakteristik limbah yang meliputi kuantitas, sifat fisik dan kimia, kandungan radionuklida serta tingkat radioaktivitas (Okoshi & Momma, 2015). Metode evaporasi merupakan teknologi yang terbukti memiliki faktor dekontaminasi dan faktor reduksi volume yang tinggi serta cocok digunakan untuk mengolah limbah radioaktif cair dengan karakteristik memiliki kandungan garam yang tinggi (Efremenkov, 1989). Evaporator tersebut memiliki faktor pemekatan hingga 50 kali (Sugito et al., 2018). Operasi evaporator IPLR didukung dengan unit boiler yang menghasilkan uap sebagai sumber pemanasan limbah yang diolah. Sistem evaporasi terdiri dari tangki penampung limbah cair radioaktif berkapasitas 50 m³ sebanyak 2 buah (R2201A dan R2201B), kolom evaporator E22001 (pemanas) yang tersusun dari pipa-pipa tempat limbah dialirkan, kolom penenang R22010, yang dilengkapi dengan cairan anti buih, kolom pemisah D22001, untuk tempat pencucian uap, pengembun (Kondensor) E22002, pengembun (*Cooler*) E22003, sistem pemompaan dan pemipaan.

Proses kerja sistem evaporasi bermula dari pengiriman limbah cair dari tangki limbah menuju kolom evaporator. Di dalam kolom ini, terjadi proses pertukaran panas, uap yang dikirim dari unit boiler dilewatkan ke dalam kolom untuk memanaskan limbah cair yang telah berada di dalam kolom evaporator. Akibat pemanasan ini, terjadi proses penguapan limbah sehingga terbentuk fase konsentrat dan fase uap. Zat radioaktif yang bersifat *non volatile* (tidak mudah menguap) akan menjadi konsentrat bersama partikel garam lainnya, sedangkan zat radioaktif yang bersifat *volatile* (mudah menguap) akan ikut menguap. Fase uap akan bergerak menuju kolom penenangan untuk memisahkan antara uap dan cairan. Uap akan terus bergerak menuju kolom pemisah untuk melalui proses pencucian gas menggunakan air demineralisasi, sehingga zat radioaktif yang terbawa dapat tertangkap oleh air pencuci tersebut. Air pencuci ini akan ditampung dalam tangki aktif (R22002). Air pencucian ini dapat berpotensi menjadi efluen yang dapat dilepas ke lingkungan jika nilai konsentrasinya di bawah nilai lepasan. Namun, jika nilai konsentrasinya tinggi, air pencucian akan dikirim kembali ke dalam tangki limbah untuk dievaporasi kembali. Uap atau gas yang tidak tertangkap oleh air pencuci,

akan bergerak menuju pengembun dan pendingin sehingga terbentuk destilat. Destilat ini merupakan calon efluen yang akan dilepas ke lingkungan, apabila konsentrasi radioaktifnya di bawah nilai batas lepasan zat radioaktif yang telah ditetapkan oleh BAPETEN. Dalam proses evaporasi, buih yang terkandung dalam limbah harus dikontrol dengan cairan anti buih. Adanya buih akan dapat mengganggu proses pemisahan fasa uap dengan cairannya, sehingga berpotensi terjadinya “*carry over*”, terbawanya zat radioaktif ke dalam uap, sehingga destilat hasil pengembunan dan pendinginan uap akan mengandung zat radioaktif melebihi dari konsentrasi yang diperkenankan.

Unit evaporasi merupakan unit pengolah limbah radioaktif cair dengan kompleksitas tinggi. Roberge (2007) menyatakan bahwa semakin kompleks suatu peralatan, akan semakin tinggi peluang untuk gagal. Analisis kegagalan merupakan metode tradisional yang mengaitkan kegagalan dengan konsekuensi yang ditimbulkan. Informasi mengenai konsekuensi dari suatu kegagalan dapat digunakan untuk menentukan prioritas pemeliharaan sebagai Upaya perbaikan dan pencegahan (Roberge, 2007). Penetapan prioritas pemeliharaan dapat dilakukan salah satunya dengan studi HAZOP (Smith, 2011).

Studi HAZOP pada sistem evaporasi dilaksanakan oleh Kelompok Keselamatan Kerja dan Operasi melalui proses *brainstorming* dan telaah dokumen teknis dengan melibatkan 3-4 orang operator sistem evaporasi dari Kelompok Pengelolaan Limbah. Operator yang dilibatkan memiliki kompetensi dan pengalaman kerja antara 27 – 35 tahun dalam hal sistem elektrikal dan mekanik. *Brainstorming* studi HAZOP dilakukan menggunakan kata bantu dan parameter yang terdapat dalam dokumen teknis (*system note*) dari sistem evaporasi. Penggunaan kata bantu dalam *brainstorming* secara sistematis membantu proses identifikasi deviasi pada titik studi HAZOP secara menyeluruh (Mokhtarname et al., 2022). Parameter yang diamati dalam studi HAZOP pada sistem evaporasi dan kata bantu yang digunakan ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 4. Kata Bantu, Parameter, Deviasi dan Batas Kondisi Operasi (BKO)

No	Kata Bantu	Parameter	Deviasi	BKO
1	KURANG	pH	pH terlalu rendah	>7
		Klorida (Cl ⁻)	Cl ⁻ rendah	>0,1 gr/L
		Ekstrak kering	Ekstrak kering rendah	>5gr/L
		Aliran limbah	Aliran limbah kurang	300-750 L/j
		Tekanan uap	Tekanan uap rendah	4-5 bar
		Tekanan	Tekanan rendah	66-70 mbar
		Temperatur uap	Temperatur uap rendah	133-136 ⁰ C
		Konduktivitas	Konduktivitas rendah	<10mikroS
		Aliran air demin	Aliran air demin rendah	200L/j
		Densitas	Densitas rendah	1103 kg/m ³
2	LEBIH	pH	pH terlalu tinggi	>7
		Klorida (Cl ⁻)	Cl ⁻ tinggi	>0,1 gr/L
		Ekstrak kering	Ekstrak kering tinggi	>5gr/L

No	Kata Bantu	Parameter	Deviasi	BKO
		Aliran limbah	Aliran limbah tinggi	300-750 L/j
		Tekanan uap	Tekanan uap tinggi	4-5 bar
		Tekanan	Tekanan tinggi	66-70 mbar
		Temperatur uap	Temperatur uap tinggi	133-136 ⁰ C
		Konduktivitas	Konduktivitas tinggi	<10mikroS
		Aliran air demin	Aliran air demin tinggi	200L/j
		Densitas	Densitas tinggi	1103 kg/m ³
3	TIDAK	Aliran limbah	Tidak ada aliran limbah	300-750 L/j
		Aliran air demin	Tidak ada aliran air demin	200L/j
		Tekanan uap	Tidak ada tekanan uap	4-5 bar
		Tekanan	Tidak ada Tekanan tinggi	66-70 mbar
4	ADA	Buih	Ada buih	Tidak ada
		Bahan organik	Ada bahan organik	Tidak ada

Hasil studi HAZOP pada sistem evaporasi disajikan dalam dokumen keselamatan IPLR. Studi HAZOP yang dilakukan berhasil mengidentifikasi beberapa potensi deviasi (yang dapat berakibat pada terjadinya kegagalan) dengan konsekuensi yang minor maupun yang dapat berdampak pada keselamatan pekerja, fasilitas dan lingkungan yang dapat terjadi. Rekapitulasi potensi deviasi yang berdampak terhadap keselamatan dan lingkungan disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Potensi Deviasi Berdampak Besar

No	Titik Studi	Potensi Deviasi	Penyebab	Akibat	Pengaman/interlok
1	Tangki limbah-Evaporator	pH limbah terlalu tinggi	Belum dilakukan kondisioning pH limbah/kondisioning belum memadai	Mudah terbentuk buih sehingga terjadi <i>carry over</i> , limbah semakin banyak	- sensor buih - alarm PAH 22012 - injector anti buih
2	Tangki limbah-Evaporator	Ada kandungan organik	Tidak dilakukan analisis pra olah	Terjadi ledakan	- analisis pra olah
3	Evaporator	Temperatur/tekanan terlalu tinggi	- suplai uap terlalu tinggi - aliran limbah rendah - konsentrat yang terbentuk belum diturunkan ke dalam tangki penampung konsentrat	- terjadi <i>crack</i> pada pipa - terjadi <i>carry over</i> - terjadi ledakan - evaporasi tidak terlaksana	- sensor temperatur/tekanan - panel alarm - pompa pengumpan limbah - valve V22071 - pengumpan limbah valve V62501 - distribusi uap

4	Cooler-Tangki Destilat	Konduktivitas terlalu tinggi	- konduktivitas air demin tinggi	False alarm	- valve V22080 pemindah konsentrat
			- kandungan radionuklida pada uap yang masuk dalam cooler tinggi	Destilat menjadi terkontaminasi, beban limbah bertambah	- sensor konduktivitas panel alarm valve V22079 menuju destilat valve V22106 menuju tangki R22002

Pada tabel 5, konsekuensi yang cukup besar dari potensi deviasi yang teridentifikasi dari studi HAZOP adalah ledakan, keretakan pada pipa evaporator, apabila hasil analisis menunjukkan konsentrasi aktivitas pada destilat di atas batas lepasan ke lingkungan maka destilat harus diperlakukan sebagai limbah. Ini berarti volume limbah yang harus diolah menjadi bertambah karena adanya *carry over* yang menyebabkan destilat terkontaminasi dan evaporasi tidak dapat dilaksanakan, sehingga limbah radioaktif cair tidak terolah.

Diskusi studi HAZOP juga berhasil mengidentifikasi sistem/komponen pengaman atau *interlock* yang berfungsi untuk memberikan sinyal adanya deviasi dan/atau untuk mencegah atau memitigasi apabila terdapat indikasi deviasi. Hasil identifikasi ini dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi perlunya penambahan sistem pengaman/*interlock* (Kościelny et al., 2017) atau kegiatan pemeliharaan yang lebih intensif untuk memastikan sistem. Sistem *interlock* merupakan suatu kelengkapan yang terpasang pada suatu sistem untuk mencegah terjadinya manuver yang tidak tepat atau untuk menjaga sistem dalam kondisi selamat, apabila terjadi suatu deviasi (Hutter, 2007).

Pengamatan selanjutnya adalah pada rekaman *logsheet* operasi yang menunjukkan kejadian dan kegiatan pemeliharaan/perbaikan terkait dengan titik kritis yang teridentifikasi pada tabel 6. Berdasarkan data rekaman operasi, ditemukan data kejadian kegagalan pada dua titik kritis. Dengan data tersebut, MTBF dapat dihitung dengan hasil pada tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi data MTBF dan titik kritis tahun 2018

Titik kritis	Jumlah kegagalan	Total waktu operasi yang dijadwalkan	Total waktu operasi yang hilang	MTBF	Failure rate
sensor buih	0	45 jam	0	∞	0
alarm PAH 22012	0	45 jam	0	∞	0
injector anti buih	0	45 jam	0	∞	0
sensor temperature/tekanan	0	45 jam	0	∞	0
panel alarm	0	45 jam	0	∞	0
pompa pengumpan limbah	0	45 jam	0	∞	0
valve V22071 pengumpan limbah	1	45 jam	43	2	0,5
valve V62501 distribusi uap	0	45 jam	0	∞	0
valve V22080 pemindah konsentrat	1	45 jam	0	45	0,02
sensor konduktivitas	0	45 jam	0	∞	0
valve V22079 menuju destilat	0	45 jam	0	∞	0
valve V22106 menuju tangki R22002	0	45 jam	0	∞	0

Pada tabel nilai tertinggi adalah 0,5, yaitu kegagalan pada komponen valve pengumpan limbah (V22071). Sedangkan nilai tertinggi kedua adalah *failure rate* = 0,02 yaitu kegagalan pada komponen valve pemindah konsentrat (V22080). Dari nilai *failure rate* tertinggi = 0,5 dan nilai *failure rate* (FR) terendah = 0, maka dapat ditentukan skala peluang berikut yaitu skala 1, FR = 0 – 0,06, skala 2, FR = 0,06 – 0,13, skala 3, FR = 0,14 – 0,25, skala 4, FR = 0,26 – 0,38, skala 5, FR = 0,39 – 0,5 .

Setelah peluang dari angka *failure rate* diperoleh, nilai risiko dapat dihitung dengan mempertimbangkan skala keparahan dari konsekuensi (mengacu pada tabel 2) yang dapat timbul dari kegagalan titik kritis dengan hasil pada tabel 7.

Tabel 7. Skala Risiko Kegagalan Sistem Pengaman/interlock berdasarkan *Failure Rate*

Kegagalan pada system pengaman/interlok	Konsekuensi	<i>Failure rate</i>	Skala-5 <i>failure rate</i>	Konsekuensi			Skala Risiko
				K1	K2	K3	
sensor buih	Volume limbah bertambah	0	1	1	1	1	1
alarm PAH 22012	Volume limbah bertambah	0	1	1	1	1	1
injector anti buih	Volume limbah bertambah	0	1	1	1	1	1
sensor temperature/tekanan	Ledakan	0	1	1	1	5	5
panel alarm	Ledakan	0	1	1	1	5	5
pompa pengumpan limbah	Limbah tidak terolah	0	2	1	1	1	2
valve V22071 pengumpan limbah	<i>Carry over, crack</i> , limbah tidak terolah	0,5	5	1	1	3	15
valve V62501 distribusi uap	Ledakan	0	1	1	1	5	5
valve V22080 pemindah konsentrat	Limbah tidak terolah	0,02	1	1	1	3	3
sensor konduktivitas	Volume limbah bertambah	0	1	1	1	1	1
valve V22079 menuju destilat	Volume limbah bertambah	0	1	1	1	1	1
valve V22106 menuju tangki R22002	Volume limbah bertambah	0	1	1	1	1	1

PEMBAHASAN

Dari hasil, nilai risiko tertinggi adalah kegagalan pada panel alarm dan valve pengumpan limbah (V22071). Nilai risiko tersebut mempertimbangkan keparahan konsekuensi apabila komponen kritis (*panel control*/valve pengumpan limbah) tetap dioperasikan dengan kondisi yang bermasalah. Komponen ini mengalami kerusakan cukup lama karena sulitnya mencari spesifikasi komponen sejenis karena komponen tersebut termasuk tipe lama yang sudah tidak diproduksi lagi. Jika V22071 tersebut gagal fungsi, maka laju alir umpan limbah tidak seimbang dengan laju alir uap (*steam*). Kondisi ini dapat menyebabkan *overheating* jika kolom evaporator terlalu panas akibat volume *steam* yang lebih besar daripada volume limbah. *Overheating* ini dapat berujung pada terjadinya *crack* (retakan) pada pipa-pipa evaporator. Beban berulang berupa panas dapat menyebabkan *crack* pada tube (Ali et al., 2020). Kondisi sebaliknya, apabila volume limbah lebih besar daripada volume *steam*, dapat menyebabkan terjadinya *luber* di dalam kolom evaporator dan terjadi *carry over* (kontaminan radioaktif terbawa ke dalam uap limbah akibat proses penguapan yang tidak sempurna).

Pada tabel 4, deviasi dengan peluang (*failure rate*) tertinggi adalah kegagalan pada valve 22071. Valve 22071 merupakan valve yang digunakan untuk mengatur laju umpan limbah radioaktif ke dalam kolom evaporator baik secara otomatis maupun secara manual. Valve tersebut bertipe diafragma dengan *actuator pneumatic*, yang dilengkapi dengan membran karet yang digerakkan oleh solenoid pneumatic dengan udara bertekanan untuk membuka dan menutup valve. Pada tahun 2018 terjadi permasalahan valve, sehingga valve tidak dapat membuka dan menutup sesuai dengan pengaturan dari panel control baik secara otomatis maupun secara manual. Pemeriksaan terhadap kerusakan valve 22071 mendapati bahwa terjadi

kerusakan pada *membrane* diafragma yang terbuat dari karet. *Membrane* tersebut getas karena usia pemakaian yang lama (Ali et al., 2020) dan akhirnya robek. Ketika mengalami kerusakan, usia pemakaian valve ini telah memasuki 29 tahun. Hal tersebut menyebabkan proses evaporasi menjadi terhambat karena laju umpan limbah tidak dapat diseimbangkan dengan laju uap yang masuk ke dalam evaporator. Perbaikan terhadap kerusakan valve 22071 membutuhkan waktu yang lama karena karet *membrane* dengan tipe yang sama sudah diskontinyu. Upaya perbaikan yang kemudian dicoba adalah modifikasi *actuator* valve menjadi *motorized* valve. *Motorized* valve ini dipilih karena kemudahan dalam perawatan, pemeliharaan termasuk kalibrasi dan perbaikannya jika terjadi kendala dalam pengoperasian valve tersebut. Sedangkan *actuator* valve yang menggunakan udara sebagai penggerakannya, memiliki tingkat kesulitan pada kalibrasi dan ketersediaan suku cadang. Langkah yang dilakukan untuk memodifikasi *actuator* valve menjadi *motorized* valve antara lain : (1) mempelajari input voltase pada penggerak *actuator*; (2) mencari padanan voltase menggunakan *actuator motorized* valve; (3) mengganti *actuator* lama dengan *actuator motorized*; (4) mengkalibrasi *actuator motorized*; (5) menguji fungsi *actuator motorized*. Modifikasi tersebut membutuhkan waktu pengerjaan selama kurang lebih 1 tahun (termasuk waktu untuk riset dan *trial and error*). Saat ini Valve 22071 sudah diubah menjadi *motorized* valve.

Penggunaan HAZOP untuk penetapan prioritas pemeliharaan telah dilakukan di beberapa fasilitas industri, di antaranya adalah perusahaan petrokimia di Tiongkok. Perusahaan tersebut melakukan analisis HAZOP secara kontinyu sebagai upaya manajemen risiko. Rekaman HAZOP selanjutnya digunakan untuk optimisasi manajemen sistem alarm (Meng et al., 2021). Aplikasi HAZOP untuk penetapan prioritas pemeliharaan di PLTU juga telah menjadi bahan diskusi kelompok oleh Melani dkk (2018) yang merupakan peneliti dari Universitas Sao Paulo Brazil. HAZOP dapat dikombinasikan dengan beberapa metode identifikasi lainnya seperti FTA dan FMEA serta MTTR untuk mendapatkan perankingan risiko dari kegagalan fungsi yang potensial terjadi (Henrique et al., 2018).

KESIMPULAN

Studi HAZOP dan perhitungan *failure rate* pada fasilitas evaporasi limbah radioaktif cair menunjukkan hasil bahwa Valve 22071 dan Valve 62501 menjadi prioritas utama dalam program pemeliharaan (dalam hal ini adalah kegiatan perbaikan) untuk bisa tetap menjamin keberlangsungan pengelolaan limbah radioaktif cair secara selamat. Prioritas tersebut angka *failure rate* dan konsekuensi yang terbesar berdasarkan hasil penilaian risiko pada tabel 7.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada rekan-rekan Kelompok Keselamatan Kerja dan Operasi serta Kelompok Pengolahan Limbah (terutama Bapak Bambang Sugito, ST rahimahullah, Bapak Masudi, S.ST dan Bapak Dzulfikri Pangestu, A.Md) yang telah membantu dalam proses pengumpulan data yang dibutuhkan dalam manuskrip ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Agency, I. A. E. (1993). *Use of probabilistic safety assessment for nuclear installations with large inventory of radioactive material*. June.
- Agency, I. A. E. (2002). *Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities (IAEA-TECDOC-1267)*. January. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1267_prn.pdf
- Agency, I. A. E. (2010). *Licensing Process for Nuclear Installations*.
- Ali, M., Ul-Hamid, A., Alhems, L. M., & Saeed, A. (2020). Review of common failures in heat

- exchangers – Part I: Mechanical and elevated temperature failures. *Engineering Failure Analysis*, 109(December 2018), 104396. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104396>
- Badan Tenaga Nuklir Nasional. (2019). BATAN Standard guidance 006–1–BATAN:2019. In *Batan*.
- Bragatto, P., & Milazzo, M. F. (2016). Risk due to the ageing of equipment: Assessment and management. *Chemical Engineering Transactions*, 53(September), 253–258. <https://doi.org/10.3303/CET1653043>
- Donald Coffelt; Chris Hendrickson. (2021). Failure Rates and Survival Probabilities. In *Fundamentals of Infrastructure Management* (pp. 4–7). [https://biz.libretexts.org/Bookshelves/Management/Book%3A_Fundamentals_of_Infrastructure_Management_\(Coffelt_and_Hendrickson\)](https://biz.libretexts.org/Bookshelves/Management/Book%3A_Fundamentals_of_Infrastructure_Management_(Coffelt_and_Hendrickson))
- Efremenkov, V. . (1989). Radioactive waste management of nuclear power plants. *IAEA Bulletin*, 4, 37–42.
- Fatma, N. F., Ponda, H., & Kuswara, R. A. (2020). Analisis Preventive Maintenance Dengan Metode Menghitung Mean Time Between Failure (Mtbf) Dan Mean Time To Repair (Mtrr) (Studi Kasus Pt. Gajah Tunggal Tbk). *Heuristic*, 17(2), 87–94. <https://doi.org/10.30996/heuristic.v17i2.4648>
- Håbrekke, S., Bodsberg, L., Hokstad, P., & Ersdal, G. (2011). Issues for consideration in life extension and managing ageing facilities. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 3(July 2014), 173–182. <https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49261>
- Health and Safety Executive. (2014). *Risk Assessment: A Brief Guide To Controlling Risks In The Workplace*. Toxicologic Pathology. www.hse.gov.uk/pubns/indgl63.htm
- Henrique, A., Melani, A., Alberto, C., Caminada, A., Francisco, G., Souza, M. De, & Ikuyo, S. (2018). *Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant*. 147.
- Hutter, G. M. (2007). *Interlocks as machine safety devices*. <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/safety/interlocks-as-machine-safety-devices>
- Kościelny, J. M., Syfert, M., Fajdek, B., & Kozak, A. (2017). The application of a graph of a process in HAZOP analysis in accident prevention system. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.09.003>
- Kotek, L., & Tabas, M. (2012). HAZOP study with qualitative risk analysis for prioritization of corrective and preventive actions. *Procedia Engineering*, 42(August), 808–815. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.473>
- Meng, Y., Song, X., Zhao, D., & Liu, Q. (2021). Alarm management optimization in chemical installations based on adapted HAZOP reports. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72(January). <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104578>
- Mokhtarnane, R., Safavi, A. A., Urbas, L., Salimi, F., Zerafat, M. M., & Harasi, N. (2022). Application of multivariable process monitoring techniques to HAZOP studies of complex processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74(October 2021), 104674. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104674>
- Nguyen, H. T., Safder, U., Kim, J. I., Heo, S. K., & Yoo, C. K. (2022). An adaptive safety-risk mitigation plan at process-level for sustainable production in chemical industries: An integrated fuzzy-HAZOP-best-worst approach. *Journal of Cleaner Production*, 339(February 2021), 130780. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130780>
- Okoshi, M., & Momma, T. (2015). Radioactive Waste Treatment Technologies. In S. Nagasaki & S. Nakayama (Eds.), *Radioactive Waste Engineering and Management* (pp. 119–151). Springer Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55417-2_5
- RADIOAKTIF, P. T. L. (2017). *Laporan Analisis Keselamatan Instalasi Pengolahan Limbah*

Radioaktif.

Roberge, P. R. (2007). *Corrosion Inspection and Monitoring*.

Smith, D. J. (2011). *Reliability, Maintainability and Risk* (8th ed.). Elsevier Ltd.

Sugito, B., Bernadi, Y., Budiyo, & Masudi. (2018). Pengolahan Limbah Radiaktif Cair Secara Evaporasi Di Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif. *Prosiding Hasil Penelitian Dan Kegiatan PTLR*, 111–117. <http://repo-nkm.batan.go.id/6994/>

Suzuki, T., Izato, Y. ichiro, & Miyake, A. (2021). Identification of accident scenarios caused by internal factors using HAZOP to assess an organic hydride hydrogen refueling station involving methylcyclohexane. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 71(April 2020), 104479. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104479>

Tochaikul, G., Phattanasub, A., Khemkham, P., Saengthamthawee, K., Danthanavat, N., & Moonkum, N. (2022). Radioactive waste treatment technology: a review. *Kerntechnik*, 87(2), 208–225. <https://doi.org/10.1515/kern-2021-1029>