

EFISIENSI KINERJA EVAPORATOR PADA PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF BATAN

Farlina Hapsari dan Nurrandi Mayas Sujati

Akademi Minyak Dan Gas (AKAMIGAS) Balongan Indramayu

Email: hapsari.farlina@gmail.com dan nurrandi@gmail.com

Abstrak

BATAN terbentuk dengan latar belakang penyelidikan terhadap adanyakemungkinan jatuhnya radioaktif dari uji coba senjata nuklir di Samudra Pasifik. Pada proses produksinya efisiensi tidak pernah mencapai 100% yang menyebabkan dihasilkannya limbah yang dikenal dengan limbah radioaktif. PTLR merupakan satuan kerja dari BATAN yang secara khusus menangani pengolahan limbah radioaktif. Salah satu unit pengolahan limbah radioaktif yakni unit evaporasi yang merupakan unit pengolahan limbah radioaktif cair dengan kapasitas pengolahan sebesar 0,75m³. Evaporator bertujuan untuk memisahkan pelarut (solvent) dari larutan untuk memperoleh larutan yang lebih pekat. Berdasarkan hasil observasi dan analisa alat evaporator pada tahun 2014 hingga 2017 nilai efisiensi cenderung menurun yakni 81,3%, 81,48%, 79,40% dan 57,09% yang diakibatkan oleh korosi dan pembentukan kerak pada plat perpindahan panas. Hasil tersebut didapat melalui perbandingan jumlah steam teoritis dengan jumlah steam aktual yang digunakan pada sistem evaporasi.

Kata Kunci: Efisiensi, Evaporasi, Kalor, Limbah Radioaktif

Pendahuluan

Seiring perkembangan teknologi masa kini dengan adanya radioaktif membawa perkembangan di dalam berbagai aspek kehidupan. Perlu kita ketahui bawasannya dengan berkembangnya teknologi membawa perubahan yang sangat signifikan akan tetapi semua itu selain memberikan pengaruh yang positif juga menimbulkan efek negatif pula. Efisiensi proses produksi yang tidak pernah mencapai 100% menyebabkan dihasilkannya limbah yang dikenal dengan limbah radioaktif. Selain dari proses produksi, limbah radioaktif juga dihasilkan dari proses pengolahan bahan baku yang secara alami mengandung senyawa aktif. Berdasarkan bentuk fisiknya, limbah radioaktif terbagi menjadi limbah padat, cair, dan semi cair. Limbah radioaktif memiliki tingkat bahaya dapat memancarkan radiasi. Pengaturan limbah radioaktif dan paparan radiasi secara internasional ditetapkan oleh *International Atomic Energy Agency*

(IAEA) dan *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), sedangkan di Indonesia diawasi oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Sebagaimana pengawasan diatur dalam Undang-Undang No.10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran Pasal 14 ayat 2 yang dilaksanakan melalui peraturan, perizinan dan inspeksi. Peraturan dan perizinan yang diberikan BAPETEN juga memperhatikan Undang – Undang No.32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan Undang-Undang No.23 Tahun 1992 tentang Kesehatan. Pengelolaan limbah radioaktif dilakukan untuk melindungi keselamatan masyarakat dan lingkungan hidup terhadap bahaya radiasi salah satunya adalah menggunakan proses evaporasi.

Karakteristik Limbah Radioaktif Cair

Limbah radioaktif cair adalah limbah yang berbentuk cairan dapat berasal dari air cucian peralatan yang terkontaminasi atau cairan zat radioaktif yang sengaja dibuang. Perlu diingat bahwa limbah radioaktif tidak boleh dibuang kedalam saluran sanitasi dengan pertimbangan tingkat aktivitas, waktu paruh, dan tingkat reaktivitas kimianya. Oleh karena itu, harus disediakan wadah yang sesuai dengan sifat fisik dan kimia dari limbah cair yang disimpan, misalnya untuk limbah cair organik tidak boleh ditempatkan dalam wadah yang terbuat dari plastic, karena kemungkinan wadah akan rusak atau bereaksi bila kontak langsung dengan bahan larutan organik. Khusus untuk limbah radioaktif cair ini, dapat digolongkan lagi sesuai dengan tingkat keracunan radionuklida dan aktivitas yang dikandungnya yaitu:

1. Kadar tinggi (*High Level Liquid Waste*)
2. Kadar rendah (*Low Level Liquid Waste*)
3. Kadar sedang (*Medium Intermediet Level Liquid Waste*)

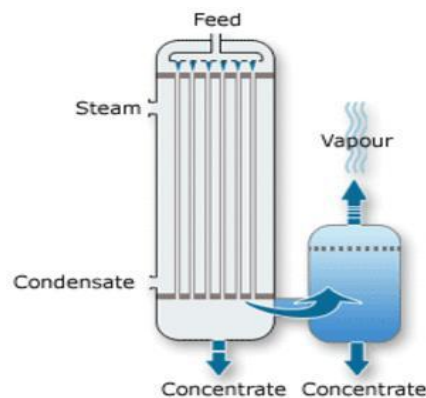
Umumnya, setiap instalasi pengolahan mempunyai ketentuan batas yang berbeda untuk setiap kadarnya tergantung dari faktor-faktor berikut:

- a. Tipe radionuklida yang terkandung dalam limbah.
- b. Fasilitas pengolahan yang tersedia dan factor dekontaminasi (FD) yang diperoleh.
- c. Tingkatan aktivitas terhadap efluen yang diizinkan dibuang kelingkungan dengan aman dan tidak membahayakan manusia, serta lingkungan.

IAEA menentukan standar baku batas kadar radionuklida yang dibolehkan dalam limbah dan untuk pembuangan efluen limbah radioaktif cair kelingkungan.

Prinsip Kerja Evaporator

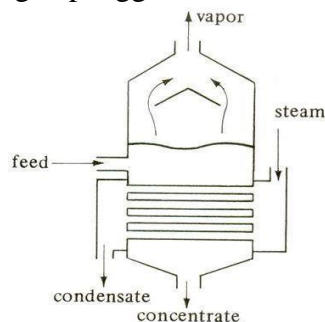
Prinsip kerja evaporator seperti yang telah kita ketahui sebelumnya, evaporator merupakan alat untuk menegevaporasi larutan sehingga prinsip kerjanya merupakan cara kerja dari evaporasi itu sendiri. Cara kerjanya ialah dengan menambahkan kalor atau panas yang bertujuan untuk memekatkan suatu larutan yang terdiri dari zat pelarut yang memiliki titik didih yang rendah dengan pelarut yang memiliki titik didih yang tinggi sehingga pelarut yang memiliki titik didih yang rendah akan menguap dan hanya menyisahkan larutan yang lebih pekat dan memiliki konsentrasi yang tinggi.



Jenis-Jenis Evaporator

1) *Horizontal Tube* Evaporator

Jenis ini merupakan evaporator yang paling klasik dan banyak diaplikasikan pada berbagai bidang industri. Umumnya, jenis ini digunakan untuk keperluan-keperluan skala kecil dengan penggunaan teknologi sederhana



(Gambar 2.2 *Horizontal Tube* Evaporator)

Kelebihan dan Kekurangan:

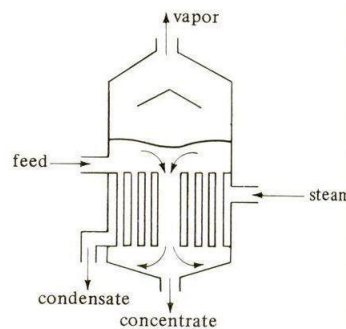
- Sulit untuk dibersihkan karena pengendapan yang memicu timbulnya kerak terjadi pada permukaan luar pipa. Kontruksi alat ini perlu didesain sedemikian rupa agar bundle pipa bisa dikeluarkan untuk keperluan pembersihan.

- Koefisien perpindahan panas cukup rendah sehingga kurang efisien, hal tersebut disebabkan karena dalam operasinya tidak memungkinkan terjadinya sirkulasi cairan.

2) *Standard Vertical-Tube* Evaporator

Prinsip kerja pada *standard vertical-tube* evaporator yakni, cairan akan mengalir di dalam pipa sementara uap (*steam*) mengalir di dalam *shell*. Di dalam tabung, cairan akan mendidih dan uap yang timbul bergerak membawa cairan ke atas. Pada tahap ini, akan terjadi sirkulasi cairan yang disebabkan oleh perbedaan

fasa antara fluida yang terdiri dari campuran uap-cair dengan cairan yang berada di bagian luar pipa. Pada bagian atas pipa terdapat ruang (bejana uap) yang berperan memisahkan cairan dengan uap. Proses pemisahan antar uap dengan cairan dalam ruang uap dimana uap akan keluar melalui saluran atas sementara cairan akan keluar melalui saluran di bagian bawah bejana, selanjutnya akan bersirkulasi kembali melalui pipa-pipa.



(Gambar 2.3 *Standard Vertical-Tube* Evaporator)

Jenis evaporator ini memiliki keunggulan yakni, perpindahan panas berlangsung dengan baik karena perpindahan panas terjadi secara *natural convection* (konveksi alami). Selain itu, endapan juga akan terbentuk di permukaan dalam pipa sehingga mempermudah pembersihannya.

Metode Penelitian

Pada penelitian ini perhitungan nilai efisiensi diperoleh dengan menentukan nilai panas spesifik *steam* masuk evaporator dan panas spesifik *steam* keluar evaporator. Penentuan nilai panas spesifik dilakukan dengan melihat tabel appendix atau melalui program excel. Menghitung kalor yang dibawa umpan (Q_{umpan}) dengan mengalikan massa umpan evaporator dengan panas spesifik umpan dan suhu umpan masuk evaporator (T). Menghitung kalor masuk yang dibawa oleh *steam* (Q_{sin}) dan *steam*

(Q_{sout}) didapat dari mengalikan massa *steam* evaporator dengan panas spesifik *steam* dan suhu *steam* masuk evaporator (T) ditambahkan massa *steam* dikali panas laten. Menghitung kalor yang dibawa konsentrat ($Q_{konsentrat}$) dengan mengalikan massa konsentrat evaporator dengan panas spesifik konsentrat dan suhu konsentrat keluar evaporator (T). Menghitung kalor masuk yang dibawa oleh *vapour* (Q_{Vapour}) didapat dari mengalikan massa *vapour* evaporator dengan panas spesifik *vapour* pada fase cair dan suhu *vapor* pada evaporator (T) ditambahkan massa *vapour* dikali panas laten dan ditambahkan massa *vapour* dikali depan c_p *vapour* pada fase gas dan perubahan suhunya. Menentukan neraca kalor dengan menjumlahkan kalor umpan dan kalor *steam* masuk sama dengan menjumlahkan kalor *steam* keluar, kalor *vapour* dan kalo konsentrat sehingga didapatkan massa *steam*. Menentukan nilai efisiensi dengan membandingkan jumlah *steam* yang digunakan pada sistem evaporasi dengan *steam* aktual. k. Dari nilai efisiensi faktor penyebab meningkat atau menurunnya nilai efisiensi evaporator.

Hasil dan Pembahasan

1. Kandungan Limbah Radioaktif

Limbah cair radioaktif memiliki kandungan yang berbeda denganlainnya, adapun kandungan tersebut seperti dibawah ini:

Tabel .1 Karakteristik Limbah Radioaktif

No	Karakteristik	Hasil Analisis
1	Radionuklida	Cs-137 : $1,05 \cdot 10^{-4}$ Ci/m ³
		Co-60 : $3,96 \cdot 10^{-5}$ Ci/m ³
2	pH	5.7
3	Ekstrak Kering	1,8 gr/l
4	Logam Terlarut	Fe : 23.76 mg/l
		Cr : 1.732 mg/l
		Zn : 2.789 mg/l
		Cu : 0.894 mg/l
		Mn : 0.863 mg/l
		Mg : 1.871 mg/l
		Al : 25.93 mg/l
		Ca : 36.66 mg/l
		Cl ⁻ : 26.9 mg/l
PO ₄ ³⁻ : 29.01 mg/l		
SO ₄ ²⁻ : 17.5 mg/l		

(Sumber: Laboratorium PTLR-BATAN)

2. Proses Sistem Evaporasi

Sebelum dievaporasi, limbah cair ditampung dalam tangki penampungan. Kemudian diambil sample untuk dianalisis apakah limbah cair yang akan dievaporasi memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan. Netralisasi asam/basa dilakukan apabila pH pada *feed* tersebut asam atau basa. Jika telah memenuhi persyaratan, limbah siap dievaporasi. Limbah radioaktif cair diumpankan ke alat evaporator dengan cara pengaliran melalui pipa yang dilewatkan dalam tangki penampung. Limbah cair masuk pada bagian *shell* sedangkan *steam* masuk pada bagian *tube*. Dengan demikian terjadi perpindahan panas sehingga terjadi penguapan. Lalu uap masuk kedalam kolom penenang sehingga uap limbah cair yang terkonsentrasi akan terpisah. Konsentrat akan masuk kedalam tangki penampung konsentrat, sedangkan uapnya akan diembunkan nanti pada kondensor. Mula mula uapnya akan masuk kedalam kolom penenang dengan temperatur $\pm 100^{\circ}\text{C}$ yang dimana didalamnya terdapatnya *baffle* sentrifugal pada bagian puncak kolom yang memungkinkan penahanan cairan yang terbawa oleh uap tersebut. Selanjutnya uap masuk bagian bawah kolom pemisah dengan temperatur $70\text{-}80^{\circ}\text{C}$. Di dalam kolom pemisah, uap dicuci oleh air bebas mineral. Kontak muka antar fase terjadi pada *5 stage bubble cap*. Sedangkan air bebas mineral masuk melalui bagian atas kolom pemisah, akhirnya uap melewati sebuah *mist eliminator* pada bagian puncak kolom. Disana terjadi penahanan kandungan cairan yang terbawa dalam *bubble cap* yang terakhir, sedangkan air bekascucian secara gravitasi akan masuk kedalam tangki penampungan *effluent* aktif. Kemudian uap meninggalkan kolom pemisah dan masuk kedalam kondensor. Temperatur pada ruang kondensor berkisar $\pm 50^{\circ}\text{C}$. Pada bagian *shell* sehingga uap akan mengembun karena pendingin air lewat bagian *tube*. Gas yang tidak terkondensasi yang keluar dari kondensor akan menuju sirkuit *off gas*. Destilat yang terbentuk dari uap yang didinginkan pada kondensor akan masuk kedalam *cooler* sehingga *temperature* menjadi $\pm 25^{\circ}\text{C}$, kemudian destilat akan bergerak menuju tangki penampungan destilat.

3. Perhitungan Efisiensi

Tabel 2. Data Operasional

YEA RS	LIQUID WASTE			STEAM		VAPOUR	KONSENTRAT	
	T (°C)	LAJU ALIR(m ³ /h)	MASSA (Kg/s)	MASSA (t/h)	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	T _v (°C)	T _k - MASSA (°C) (Kg/s)
2014	25	0,98	0,27	1,3	98	100	100	28 0,0028
2015	25	0,76	0,214	1	98	105	105	30 4,41.10 ⁻³
2016	25	0,745	0,208	1,275	100	105	105	30 0,002
2017	25	0,7	0,22	1,25	103	103	103	28 0,03

$$Q = mC_pT \quad \text{dan} \quad Q = m \times L$$

Keterangan:

Q = Kalor (Kj/s)

M_f = Massa (Kg/s)

L = Panas Laten (Kj/Kg)

C_p = Spesifik Panas (Kj/Kg.K)

T_f = Temperatur (K)

a) Kalor yang dibawa umpan

$$C_{pf} = 4,363 \text{ Kj/Kg.K}$$

$$Q = m \times C_p \times T$$

$$Q = 0,27 \text{ kg/s} \times 4,363 \text{ Kj/Kg.K} \times 298\text{K} = 351,05 \text{ Kj/s}$$

b) Kalor yang dibawa steam

$$C_{psin} = 2,021 \text{ ————} , L_s = 2262,1 \text{ ————}$$

$$Q_{sin} = (m_s \times C_{ps} \times T_s) + (m_s \times L_s)$$

$$= m_s (\text{—————}) \times 371\text{K} + m_s (2262,1 \text{ ————}) = 3011,89 \text{ Kj/Kg ms}$$

$$C_{psout} = 2,029 \cdot$$

$$Q_{\text{sout}} = m_s \times C_{ps} \times T_s$$

$$= m_s \times (2,029) \times 373\text{K} = 756,817 \text{ Kj/Kg ms}$$

c) Kalor yang dibawa konsentrat

$$C_p = 4,36$$

$$Q = m \times C_p \times T$$

$$= 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \times 4,363 \times 301\text{K} = 3,68 \text{ Kj/s}$$

d) Kalor yang dibawa oleh vapour

$$M_v = M_f - M_k$$

$$0,27 \text{ kg/s} - 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 0,267 \text{ Kg/}$$

$$C_{p\text{cair}} = 4,178 \text{ ————}, L_v = 2435,4 \text{ ————} C_{p\text{uap}} = 1,948$$

$$Q = (m \times C_{p\text{cair}} \times T_{\text{cair}}) + (m \times L) + (m \times C_{p\text{uap}} \times (T_{v\text{uap}} - T_{v\text{cair}}))$$

$$= (0,267 \text{ Kg/s} \times 4,178 \text{ ————} \times 303\text{K}) + (0,267 \text{ Kg/s} \times 2435,4 \text{ ————} (0,267$$

$$\text{Kg/s} \times 1,948 \text{ ————} \times (373\text{K} - 303\text{K}))$$

$$= 1025,43 \text{ Kj/s}$$

e) Neraca Kalor

$$Q_f + Q_{\text{sin}} = Q_{\text{sout}} + Q_v + Q_k$$

$$351,05 \text{ Kj/s} + (3011,89 \text{ ————} \text{ ————}) \text{ms} = (756,817 \text{ ————} \text{ ————}) \text{ms} + 1025,43 \text{ Kj/s} + 3,68 \text{ Kj/s}$$

$$M_{\text{steam}} = 0,3 \text{ Kg/s}$$

f) Efisiensi Termal

$$\text{Massa steam aktual} = 1300 \text{ Kg/jam} = 0,361 \text{ Kg/s}$$

$$\eta = \text{—————} \times 100\%$$

$$= \text{———} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} &= \\ &= 83,3\% \text{ (2014)} \end{aligned}$$

Analisis efisiensi kalor dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui efisiensi penggunaan energi kalor dalam pengolahan limbah radioaktif secara evaporasi di PTLR. Dari hasil analisis 2014 hingga 2017 didapatkan bahwa sistem evaporasi memiliki efisiensi kalor sebesar 83,3%, 81,48%, 79,4% dan 57,09% . Angka tersebut didapat melalui perbandingan jumlah steam teoritis dengan jumlah steam aktual pada sistem evaporasi. Nilai efisiensi kalor terjadi sedikit penurunan pada tahun 2014 dan 2015 yang sebelumnya 83,3% menjadi 81,48% lalu turun kembali menjadi 79,40%. Namun, tahun 2015 terjadi perbaikan pada alat ukur dan pembersihan kerak dalam ruang evaporator sehingga penurunan efisiensi tidak terlalu signifikan. Pada tahun 2017 terjadi penurunan nilai efisiensi kalor yang cukup signifikan yang sebelumnya 79,40% menjadi 57,09%. Terjadinya penurunan dikarenakan tidak teraturnya perbaikan alat ukur dan pembersihan kerak pada plat perpindahan panas didalam evaporator, kualitas dari temperatur umpan yang buruk, tekanan serta panas yang keluar dari sistem.

3. Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Evaporator

Tidak sempurnanya nilai efisiensi kalor disebabkan oleh beberapa hal, salah satunya oleh *pressure drop*. *Pressure drop* disebabkan karena adanya gaya gesek yang terjadi dengan pipa. Gaya gesek tersebut dapat meningkatkan tahanan pada transfer massa dari boiler menuju evaporator, sehingga properti steam yang dihasilkan pada boiler tidak sama dengan steam yang digunakan di evaporator. Selain *pressure drop*, efisiensi juga sangat dipengaruhi oleh transfer panas keluar sistem. Pada praktiknya, kalor yang dibawa oleh steam tidak sepenuhnya digunakan untuk memisahkan konsentrat dan destilat, melainkan juga didapat kalor yang lepas pada pipa dari boiler menuju evaporator, dan bahkan perpindahan panas keluar sistem juga terjadi pada evaporator. *Pressure drop* dan pelepasan kalor kelingkuangan tidak dapat dicegah, melainkan hanya dapat dikurangi dampaknya pada sistem evaporasi. Selain *pressure drop* dan transfer panas keluar sistem, penurunan efisiensi kalor juga dapat disebabkan karena reaksi antara limbah radioaktif cair dengan peralatan yang digunakan (korosi, kerak). Korosi dan kerak pada permukaan

penghantar panas dapat menghambat proses perpindahan panas pada evaporator sehingga dibutuhkan steam yang lebih banyak agar evaporasi berjalan normal. Selain itu, penurunan efisiensi kalor dapat disebabkan karena terdapat pipa yang bocor, kesalahan alat ukur, dan sebagainya.

Kesimpulan

Setelah melakukan tugas akhir di PTLR BATAN dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Proses yang terjadi pada sistem evaporasi yakni, limbah radioaktif cair diumpukan ke alat evaporator dengan cara pengaliran melalui pipa yang dilewatkan dalam tangki penampung. Limbah cair masuk pada bagian *tube* sedangkan *steam* masuk pada bagian *shell*. Dengan demikian terjadi perpindahan panas sehingga terjadi penguapan. Lalu uap masuk kedalam kolom penenang sehingga uap limbah cair yang terkonsentrasi akan terpisah. Konsentrat akan masuk kedalam tangki penampung konsentrat, sedangkan uapnya akan diembunkan nanti pada kondensor.
2. Analisis efisiensi kalor dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui efisiensi penggunaan energi kalor dalam pengolahan limbah radioaktif secara evaporasi di PTLR. Dari hasil analisis 2014 hingga 2017 didapatkan bahwa sistem evaporasi memiliki efisiensi kalor sebesar 83,3%, 81,48%, 79,40% dan 57,09% . Angka tersebut didapat melalui perbandingan jumlah *steam* teoritis dengan jumlah *steam* aktual yang digunakan pada sistem evaporasi.
3. Hal-hal yang mempengaruhi efisiensi yaitu *pressure drop* pada pipa, transfer panas ke lingkungan, pembentukan korosi dan kerak, serta berbagai hal yang dapat memengaruhi kualitas *steam*.

BIBLIOGRAFI

- Al-Shemmeri. 2010. *Handbook Engineering Thermodynamics*.-: Ventus
- Daryoko, Mulyono. 2007. *Handbook Prancangan Evaporator Untuk Pengolahan Limbah Radioaktif Cair PLTN PWR 1000 MW*. Serpong: PTLR-BATAN
- Fitri, Willshon. 2015. Laporan Kerja Praktek Pengolahan Limbah Radioaktif di PTLR-BATAN. Serpong: PTLR-BATAN
- Johan, Bahdir. 2000. Buletin Limbah. Serpong: P2PLR-BATAN
- Krisyadi, Andreas. 2017. Laporan Kerja Praktek Analisis Efisiensi Kalor Sistem Evaporasi. Serpong: PTLR BATAN
- Nicholas. 2000. *Handbook of Chemical Processing Equipment*. Boston: Butterworth-Heinemann
- Senger, Wattson. 1986. *Handbook of Journal of Physical and Chemical Reference Data 15*.-.-
- Walman, Edo. 1994. Diklat Operasi Teknik Kimia Pengolahan Limbah Radioaktif. Serpong: PTLR-BATAN
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 27 tahun 2002 Tentang Pengolahan Limbah Radioaktif