

Perancangan Evaporator Shell And Tube untuk Pemulihan Limbah Stabilizer Thermal sebagai Upaya untuk Mendukung Pengelolaan Limbah Berkelanjutan

DEA KANIA PERTIWI¹, MOHAMAD RANGGA SURURI¹

1. Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jalan PHH Mustafa No.23, Kota Bandung 40124, Indonesia
Email : deakaniapertiwi@gmail.com

ABSTRAK

Pengelolaan limbah industri yang mengandung senyawa kimia berbahaya tetapi bernilai ekonomis, seperti limbah stabilizer thermal, merupakan tantangan penting dalam upaya mewujudkan industri berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem evaporator tipe shell and tube sebagai solusi teknologi untuk pemulihan air dan NH_4Cl dari limbah stabilizer thermal. Metode yang digunakan adalah metode kuantitatif dimana dilakukan pengumpulan data primer dan sekunder terkait karakteristik fisik dan kimia limbah, perhitungan kebutuhan energi, serta dimensi unit evaporator menggunakan rumus-rumus perpindahan panas dan neraca massa. Hasil perancangan menunjukkan bahwa evaporator tipe shell and tube membutuhkan laju perpindahan kalor sebesar 14.799.823 watt untuk dapat memisahkan air dan NH_4Cl dari air limbah melalui proses pemanasan, sehingga menghasilkan produk yang dapat didaur ulang atau dimanfaatkan kembali. Luas perpindahan panasnya yaitu sebesar 130 m^2 dan diperoleh jumlah tube yang dibutuhkan adalah 227 buah untuk diameter tube 0,0381 dan panjang 6 m dan diameter shell 0.85 m. Teknologi ini tidak hanya mengurangi volume limbah berbahaya yang harus dibuang, tetapi juga mendukung prinsip pemulihan sumber daya dan efisiensi energi dalam pengelolaan limbah industri. Dengan demikian, penerapan evaporator ini berpotensi memberikan dampak positif baik secara lingkungan maupun ekonomi..

Kata kunci: evaporator shell and tube , pemulihan sumber daya, pengelolaan limbah, stabilizer thermal

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan industri kimia dan manufaktur yang pesat berdampak langsung terhadap peningkatan jumlah dan kompleksitas limbah yang dihasilkan. Salah satu jenis limbah yang memerlukan perhatian khusus adalah limbah stabilizer thermal. Stabiliser merupakan senyawa yang digunakan untuk melindungi PVC agar tidak mengalami degradasi. Degradasi PVC dapat mengakibatkan pembentukan ikatan rangkap pada polimer. Ikatan rangkap tersebut dapat mengubah warna PVC menjadi warna hitam. Saat ini, jenis stabiliser sudah banyak dibuat. Pada pembuatan stabiliser, beberapa produk samping terbentuk dan dapat dimanfaatkan (Zahra & Nurizqulloh, 2021). Produksi stabilizer thermal menghasilkan limbah yang mengandung NH_4Cl dengan jumlah 1-2 ton setiap 1 ton produk (Putrawan dkk., 2024).

Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah ammonium klorida ditemukan pada tahun 1949, yaitu *recovery* amonium klorida pada industri manufaktur vinil klorida. Proses berlangsung dengan mereaksikan senyawa *trichloroethane* dengan *anhydrous ammonia*. Proses *recovery* berlangsung menggunakan teknologi evaporasi-kristalisasi. Pada proses tersebut dihasilkan kemurnian amonium klorida sebesar 98,4%-massa (Stowe & Morris, 1951).

Evaporator merupakan alat yang berfungsi untuk memekatkan suatu larutan dengan menguapkan pelarut yang ada pada zat tersebut. Pada evaporator terjadi dua peristiwa yaitu transfer panas yaitu energi panas yang diperlukan untuk menguapkan pelarut dan transfer massa yaitu massa berpindah dari fasa cair ke uap selama penguapan pelarut. Uap air atau steam, adalah sumber panas yang paling umum digunakan (Ariesmayana & Zaman, 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk merancang unit evaporator shell and tube yang dapat digunakan untuk proses pemulihan limbah stabilizer thermal. Pendekatan kuantitatif dilakukan untuk menganalisis parameter desain, seperti laju perpindahan panas, luas permukaan perpindahan panas, dan dimensi unit evaporator. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pengelolaan limbah industri yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan tujuan merancang evaporator tipe shell and tube yang dapat digunakan untuk proses pemulihan limbah stabilizer thermal. Metode kuantitatif dipilih untuk memungkinkan perhitungan dan analisis teknis yang akurat berdasarkan data numerik, baik dari literatur maupun hasil pengukuran langsung.

2.1 Penentuan Kondisi Operasi

Pada tahap awal perhitungan rancangan unit evaporator diperlukan data kondisi operasi untuk menetapkan parameter dasar yang menjadi acuan utama dalam proses desain dan analisis kinerja alat. Tanpa kondisi operasi yang jelas, perhitungan teknis seperti laju perpindahan panas, luas permukaan, dan dimensi alat tidak dapat dilakukan secara akurat. Di bawah ini merupakan data kondisi operasi yang akan digunakan pada proses perhitungan dimensi evaporator:

- Suhu steam (pemanas) masuk : 150 °C
- Suhu steam (pemanas) keluar : 90 °C
- Suhu feed masuk : 25 °C
- Suhu feed keluar : 100 °C
- Tube gauge = 16 BWG
- Tube OD = 1.5 inch
- Ketebalan = 0.065 inch
- Tube ID = 1.370 inch
- Panjang Tube = 6 m
- Massa Air yang Diuapkan: 51.271,36 kg

- Total Massa Umpan (Air + NH_4Cl): 71.210,23 kg
- Waktu Proses per Batch: 4 jam (240 menit)
- Panas laten penguapan air pada 100°C adalah sekitar 2.256 kJ/kg.
- $C_p = 3,925 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
- $U = 2.000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

2.2 Langkah Perhitungan Dimensi Evaporator

Perancangan evaporator dilakukan melalui beberapa tahapan perhitungan teknis sebagai berikut:

- Penentuan laju perpindahan panas total (Q)
- Perhitungan *Log Mean Temperature Difference* (LMTD)
- Perhitungan Luas Perpindahan Panas (A)
- Penentuan Jumlah Tube
- Perhitungan Tube Pitch
- Perhitungan Tube Bundle
- Perhitungan Diameter Shell
- Perhitungan Jarak Baffle

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan laju perpindahan panas total (Q)

$$\text{Beban Panas Total } (Q_{\text{total}}) = \text{Panas Laten } (Q_l) + \text{Panas Sensibel } (Q_s)$$

a. Panas Latent

$$Q_l = \dot{m}_{\text{uap}} \times \Delta H_v$$

Keterangan :

$\dot{m}_{\text{uap}}$ = Laju massa air yang diuapkan (kg/jam)

ΔH_v = Panas penguapan laten air pada suhu didih (kJ/kg)

Maka,

$$Q_l = 12.818 \text{ kg/jam} \times 2.256 \text{ kJ/kg} = 28.917.408 \text{ kJ/jam}$$

b. Panas Sensible

$$Q_s = \dot{m}_{\text{umpan}} \times C_p \times \Delta T$$

Keterangan :

$\dot{m}_{\text{umpan}}$ = Laju massa total umpan (kg/jam)

C_p = Kapasitas panas spesifik larutan (kJ/kg·K)

ΔT = Perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$ atau K)

Maka,

$$Q_s = 17.803 \text{ kg/jam} \times 3,925 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \times 348,15 \text{ K} = 24.327.599,22 \text{ kJ/jam}$$

c. Panas Total

$$Q_{\text{total}} = 28.917.408 + 24.327.599,22 = 53.245.007,22 \text{ kJ/jam}$$

Perhitungan Log Mean Temperature Difference (LMTD)

$$\Delta T_1 = T_{\text{hot in}} - T_{\text{Cold out}} = 423.15 - 373.15 = 50 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{hot out}} - T_{\text{Cold in}} = 363.15 - 298.15 = 65 \text{ K}$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{50 - 65}{\ln\left(\frac{50}{65}\right)} = 57,17$$

Perhitungan Luas Perpindahan Panas (A)

$$A = \frac{14.799.823 \text{ W}}{2.000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} \cdot 57,17 \text{ K}} = 129.44 \text{ m}^2 \sim 130 \text{ m}^2$$

Penentuan Jumlah Tube

$$N_t = \frac{163 \text{ m}^2}{\frac{22}{7} \times (0.0381) \text{ m} \times 6 \text{ m}} = 226.88 \text{ buah} \sim 227 \text{ buah}$$

Jadi jumlah tube minimal yang ada dalam evaporator yaitu sebanyak 227 buah.

Perhitungan Tube Pitch

Jarak tube pitch dapat ditentukan dengan persamaan dibawah ini:

$$P_t = 1.25 \times d_o$$

Keterangan:

P_t = Tube pitch (m)

d_o = Diameter luar tube (m)

Maka,

$$P_t = 1.25 \times 0.0381 \text{ m} = 0.05 \text{ m}$$

Jadi, jarak minimal antara pusat tube ke pusat tube yang lain minimal 0,05 m.

Perhitungan Tube Bundle

Tube evaporator akan dirancang dengan layout Triangular pitch (pola segitiga) dipilih agar lebih banyak tube bisa dimuat lebih compact. sehingga nilai K_1 0.319 dan N_i 2.142.

Keterangan:

D_b = Diameter bundle tube (m)

d_o = Diameter luar tube (m)

N_t = Jumlah tube

$$D_b = d_o \times \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1}$$

$$D_b = 0.0381 \text{ m} \times \left(\frac{227}{0.319} \right)^{1/2.142} = 0.82 \text{ m}$$

Perhitungan Diameter Shell

Berikut merupakan perhitungan diameter shell :

$$D_s = D_b + BDC$$

Keterangan:

D_s = Diameter bundle (m)

D_b = Diameter bundle tube (m)

BDC = Bundle diameter clearance (m)

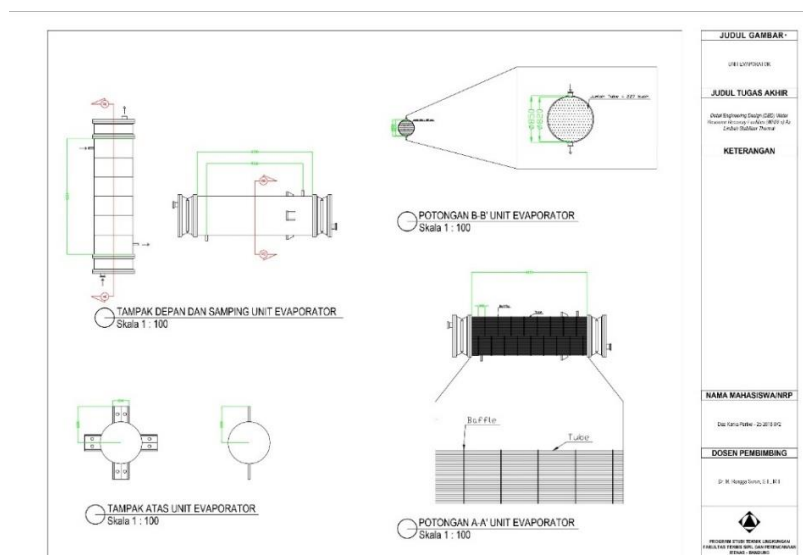
Maka,

$$D_s = 0.82 \text{ m} + 0.025 \text{ m} = 0.845 \sim 0.85 \text{ m}$$

Perhitungan Jarak Baffle

$$B_s = 0.4 \times D_s = 0.4 \times 0.85 = 0.34 \text{ m}$$

Berikut ini merupakan gambar dari perancangan evaporator tersebut :



Gambar 1. Desain Unit Evaporator (Sumber: Hasil Analisis, 2025)

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perancangan evaporator tipe shell and tube dapat menjadi solusi teknis yang efektif untuk pengelolaan limbah stabilizer thermal di industri. Berdasarkan hasil perhitungan kuantitatif, diperoleh kebutuhan luas permukaan perpindahan panas sebesar 130 m² dengan total 227 buah tube dengan diameter 0,038 m dan panjang 6 m, diameter shell 0,85 m, membutuhkan kalor sebesar 14.799.823 watt untuk mendukung proses recovery dengan menggunakan evaporator.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah ikut serta dalam membantu penelitian ini hingga tulisan penelitian ini dipublikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariesmayana, A., & Zaman, A. S. (2018). Efisiensi Sistem Evaporator Dan Karbon Aktif Untuk Mengurangi Kadar Fenol Pada Hasil Air Buangan Produksi Pt. Latinusa, TBK. *JURNALIS*, 1(1).
- Meseh, K., & Dymek, A. (2017). *Methyl and Octyl Tin - Reach Compliant High Performance Stabilizer for PVC Film Manufacture*.
- Putrawan, I. D. G. A., Azharuddin, A., Komariah, H., & Egashira, R. (2024). Techno-economic analysis of cleaner alternatives for recovering ammonium chloride from wastewater generated by polyvinyl chloride thermal stabilizer plants. *Cleaner Engineering and Technology*, 21, 100787. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100787>
- Stowe, S. C., & Morris, E. K. (1951). *Recovery of ammonium chloride from solution in liquid ammonia*.
- Zahra, N., & Nurizqulloh, M. (2021). *Rekoveri Amonium Klorida Dari Air Limbah*. Institut Teknologi Bandung.