

# PERHITUNGAN DESAIN *PREHEATER CRUDE PHTHALIC ANHYDRIDE* DI PT PETROWIDADA

Denise Ayu Yustikaningrum<sup>1</sup>, Frederika Lydia Stefani Setiawan<sup>1</sup>, Yanty Maryanty<sup>1</sup>,  
M. Nur Lafe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

<sup>2</sup>PT Petrowidada Gresik, Jl. Prof. Dr. Muhammad Yamin S.H., Kabupaten Gresik, Jawa Timur,  
Indonesia

[deniseeningrum@gmail.com](mailto:deniseeningrum@gmail.com); [[yanty.maryanty@polinema.ac.id](mailto:yanty.maryanty@polinema.ac.id)]

## ABSTRAK

PT Petrowidada merupakan satu-satunya pabrik produsen *Phthalic Anhydride* di Indonesia. *Phthalic Anhydride* merupakan hasil reaksi oksidasi antara *Ortho-Xylene* dan Oksigen. *Phthalic Anhydride* yang belum murni disebut sebagai *Crude Phthalic Anhydride*. *Crude Phthalic Anhydride* perlu melalui *Ageing Tank* (RE-3310) untuk proses evaporasi dan peningkatan temperatur dari 150°C menjadi 280°C dengan bantuan TH-Oil sebagai media pemanas. Proses pemanasan *Crude Phthalic Anhydride* menggunakan *Ageing Tank* (RE-3310) membutuhkan energi yang tinggi. Tujuan penulisan artikel ini adalah menghitung desain *Preheater Phthalic Anhydride* dengan spesifikasi alat yang sesuai untuk memanaskan *Crude Phthalic Anhydride* dari 150°C menjadi 210°C sebelum menuju *Ageing Tank* (RE-3310) menggunakan *steam* 30 bar. *Preheater Phthalic Anhydride* diharapkan dapat membantu penghematan energi yang diperlukan *Ageing Tank* (RE-3310). Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan spesifikasi *preheater* tipe *Shell and Tube Heat Exchanger* dengan panjang *tube* 1,6 meter, diameter luar 1,5 inch, diameter dalam 1,4 inch, berjumlah 62 buah pipa. *Shell* berdiameter dalam 21,25 inch yang dilengkapi dengan 5 buah *baffle* dengan *baffle space* berukuran 12 inch.

**Kata kunci:** *phthalic anhydride, preheater, shell and tube heat exchanger*

## ABSTRACT

PT Petrowidada is the only *Phthalic Anhydride* factory in Indonesia. *Phthalic Anhydride* is the product of oxidation reaction between *Ortho-Xylene* and Oxygen. Impure *Phthalic Anhydride* is called *Crude Phthalic Anhydride*. *Crude Phthalic Anhydride* should be evaporated and heated from 150°C to 280°C with the TH-Oil, the hot fluid of *Ageing Tank* (RE-3310). The heating process of *Crude Phthalic Anhydride* using *Ageing Tank* (RE-3310) requires high energy. The purpose of the *Phthalic Anhydride Preheater* design is obtaining the specification of heating equipment to increase the temperature of *Crude Phthalic Anhydride* from 150°C to 210°C using 30 bar steam. *Phthalic Anhydride Preheater* is expected decreasing the energy needed in *Ageing Tank* (RE-3310). Based on the calculations, the type of *preheater* is *Shell and Tube Heat Exchanger* with the specification of tubes are 1,6 meter in length, 1,5 inch of outside diameter, 1,4 inch of inside diameter, and in amount of 62 tubes. The inside diameter of shell is 21,25 inch with 5 baffles and 12 inch of the baffle spacing.

**Keywords:** *phthalic anhydride, preheater, shell and tube heat exchanger*

## 1. PENDAHULUAN

PT Petrowidada adalah satu-satunya pabrik di Indonesia yang memproduksi *Phthalic Anhydride* (PA). *Phthalic Anhydride* merupakan bahan baku produksi pelunak plastik (*plasticizer*). *Phthalic Anhydride* di PT Petrowidada diproduksi melalui tiga tahap utama, yaitu

---

Corresponding author: Yanty Maryanty

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: [yanty.maryanty@polinema.ac.id](mailto:yanty.maryanty@polinema.ac.id)



tahap oksidasi, sublimasi, dan distilasi. Pada tahap oksidasi, terdapat reaksi antara *Ortho-Xylene* dengan Oksigen di dalam sebuah *Multitube Packed Bed Reactor* (RE-3130) [1]. Reaksi oksidasi *Ortho-Xylene* dilakukan dengan bantuan katalis Vanadium Pentaoksida ( $V_2O_5$ ) [2]. Reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride* merupakan reaksi yang bersifat sangat eksotermis [3]. Kondisi tersebut menyebabkan reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride* menghasilkan panas selama proses reaksi terjadi. Reaksi antara *Ortho-Xylene* dengan Oksigen untuk menghasilkan *Phthalic Anhydride* ini mampu menghasilkan energi dari 14.000 hingga lebih dari 23.000 kJ/kg sehingga perlu dilakukan peninjauan temperatur reaktor dengan cara melewati campuran leburan garam [4]. Campuran leburan garam yang digunakan di PT Petrowidada adalah *Potassium Nitrate* ( $KNO_3$ ) 53%, *Sodium Nitrate* ( $NaNO_3$ ) 7%, dan *Sodium Nitrite* ( $NaNO_2$ ) 40%. Campuran leburan garam tersebut memiliki kapasitas panas yang tinggi yaitu  $0,139 \pm 0,002$  kJ/K/mol [5]. Campuran leburan garam *Potassium Nitrate* ( $KNO_3$ ) 53%, *Sodium Nitrate* ( $NaNO_3$ ) 7%, dan *Sodium Nitrite* ( $NaNO_2$ ) 40% dapat mengambil panas dari reaktor dan mendistribusikan panas tersebut Reaktor Boiler (HE-3131) untuk menghasilkan *steam* sehingga Reaktor Oksidasi (RE-3130) tetap pada temperatur 365°C.

Panas yang diproduksi dari proses oksidasi tersebut disebut juga sebagai *industrial waste heat*. *Industrial waste heat* merupakan energi yang dihasilkan dalam proses industri dan tidak digunakan kembali sehingga dapat hilang, terbuang, maupun dibuang ke lingkungan [6]. Panas limbah industri dari proses oksidasi di PT Petrowidada dimanfaatkan dalam produksi *steam* untuk nantinya digunakan dalam proses lainnya. *Steam* merupakan gas panas yang terbentuk dari proses pendidihan yang mengakibatkan perubahan fase air dari liquid menjadi gas [7]. *Steam* dibentuk melalui proses pemanasan langsung [8]. Pembentukan *steam* di PT Petrowidada dilakukan dengan mengontakkan air hasil demineralisasi dengan campuran larutan garam *Potassium Nitrate* ( $KNO_3$ ) 53%, *Sodium Nitrate* ( $NaNO_3$ ) 7%, dan *Sodium Nitrite* ( $NaNO_2$ ) 40% yang telah menyerap panas dari reaktor oksidasi.

Secara umum, *steam* yang dihasilkan oleh proses produksi *Phthalic Anhydride* memiliki tekanan 48 bar sehingga selanjutnya diproses pada *Flash Tank* (DV-3152) untuk dilakukan proses penurunan tekanan. *Flash tank* merupakan alat yang digunakan untuk memisahkan kondensat dan uap bertekanan serta memiliki temperatur tinggi yang masih bercampur dengan air panas (*flash steam*) untuk mengontrol proses produksi dari *steam* tersebut [9]. Proses penurunan tekanan menghasilkan *steam* dengan berbagai macam tekanan, di antaranya 42 bar, 30 bar, 15 bar, 4 bar, dan 2 bar untuk selanjutnya dialirkan ke proses yang telah dipetakan. Namun, terdapat *steam* berlebih yang belum termanfaatkan, salah satunya adalah *steam* 30 bar. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemanfaatan *steam* 30 bar berlebih secara lebih lanjut sebagai upaya pemanfaatan *industrial waste heat* dengan baik.

Di samping itu, proses lain yang terjadi untuk mendapatkan *Phthalic Anhydride* murni adalah tahap distilasi. Proses distilasi merupakan proses pemurnian berdasarkan titik didih dan *relative volatility* dari komponen zat [10]. Sebelum *Crude Phthalic Anhydride* masuk ke kolom distilasi, *Crude Phthalic Anhydride* perlu melalui *Ageing Tank* (RE-3310) terlebih dahulu. *Crude Phthalic Anhydride* yang masuk akan dinaikkan temperaturnya dari 150°C menjadi 280°C dengan bantuan *TH-Oil* suhu 330°C sebagai media pemanas. Pemanasan awal sebelum *Crude Phthalic Anhydride* memasuki *Topping Column* (TW-3320) berfungsi agar *Light Boiling Residu* (LBR) yang terdiri atas *Maleic Anhydride*, *Benzoic Acid*, dan *Citraconic Acid* dapat terpisahkan dengan lebih cepat dari *Phthalic Anhydride* ketika komponen masuk ke *Topping*

Column (TW-3320) karena telah berada pada titik didihnya. Namun, proses pemanasan media pemanas *Ageing Tank* (RE-3310) yang digunakan untuk peningkatan suhu *Crude Phthalic Anhydride* membutuhkan energi yang sangat besar, yaitu 2.523.221 kJ/jam (Data Industri). Oleh karena itu, direncanakan untuk dilakukan penambahan.

Berdasarkan hal tersebut, dilakukan desain perhitungan *Preheater Crude Phthalic Anhydride*. Perhitungan desain *Preheater Phthalic Anhydride* bertujuan untuk mendapatkan spesifikasi alat yang sesuai untuk memanaskan *Crude Phthalic Anhydride* dari 150°C menjadi 210°C sebelum menuju *Ageing Tank* (RE-3310) menggunakan *steam* 30 bar. *Preheater Phthalic Anhydride* diharapkan dapat membantu penghematan energi yang diperlukan *Ageing Tank* (RE-3310) di PT Petrowidada.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1. Teknik Pengumpulan Data

Dalam proses predesain *Preheater Crude Phthalic Anhydride*, diperlukan beberapa data dalam menunjang perhitungan. Data yang dibutuhkan didapatkan dari pengamatan langsung di lapangan serta literatur. Hasil pengambilan data yang diperoleh dari pengambilan data di lapangan di antaranya adalah lokasi penempatan *preheater*, laju alir fluida, kondisi operasi fluida masuk dan keluar. Data lain yang diperoleh dari literatur PT Petrowidada yaitu entalpi, viskositas, konduktivitas, dan *specific gravity phthalic anhydride*. Data penunjang lain didapatkan dari buku referensi berupa *Process Heat Transfer*, D.Q. Kern dan Geankoplis.

### 2.2. Perhitungan Penentuan Jenis *Heat Exchanger*

$$Q = W \times C_p \times \Delta T \quad (1)$$

Keterangan:

Q = Jumlah panas yang dipindahkan (BTU/jam)

W = Laju alir fluida (lb/jam)

C<sub>p</sub> = *Specific heat fluids* (BTU/jam)

ΔT = Perbedaan temperatur fluida masuk dan fluida keluar (°F)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (2)$$

Keterangan:

ΔT<sub>LMTD</sub> = Perbedaan temperature rata-rata logaritmik

T<sub>1</sub> = Suhu masuk fluida panas (°F)

T<sub>2</sub> = Suhu keluar fluida panas (°F)

t<sub>1</sub> = Suhu masuk fluida dingin (°F)

t<sub>2</sub> = Suhu keluar fluida dingin (°F)

$$A = \frac{Q}{U_D \times \Delta T_{LMTD}} \quad (3)$$

Keterangan:

A = Luas permukaan perpindahan panas (ft<sup>2</sup>)

Q = Nilai kalor yang dilepaskan atau diterima (BTU/jam)

$\Delta T_{LMTD}$  = Selisih suhu rata-rata logaritmik (°F)

$U_D$  = Koefisien perpindahan panas (BTU/ft<sup>2</sup>.jam.°F)

Jenis *heat exchanger* ditentukan melalui hasil perhitungan luas perpindahan panas. Berdasarkan Geankoplis [11], berikut merupakan ketentuan nilai penentuan jenis *heat exchanger*. Jika  $A < 120 - 200 \text{ ft}^2$ , *heat exchanger* berjenis *Double Pipe Heat Exchanger* (DPHE). Jika  $A > 120 \text{ ft}^2$ , *heat exchanger* berjenis *Shell and Tube Heat Exchanger* (STHE). Jika  $A > 350 \text{ ft}^2$ , *heat exchanger* berjenis *Plate Heat Exchanger* (PHE)

### 2.3. Perhitungan Desain Heat Exchanger

$$T_c = T_2 + F_c(T_1 - T_2) \tag{4}$$

$$t_c = t_1 + F_c(t_2 - t_1) \tag{5}$$

Keterangan:

$T_c$  = Caloric temperature fluida panas (°F)

$t_c$  = Caloric temperature fluida dingin (°F)

$F_c$  = Caloric temperature factor

$T_1$  = Suhu masuk fluida panas (°F)

$T_2$  = Suhu keluar fluida panas (°F)

$t_1$  = Suhu masuk fluida dingin (°F)

$t_2$  = Suhu keluar fluida dingin (°F)

Faktor koreksi ( $F_c$ ) didapatkan dari pembacaan hasil plot nilai S dan R pada Gambar 17, D.Q. Kern.

Penentuan dimensi *heat exchanger* dilakukan beberapa prosedur yang diawali dengan *trial* spesifikasi dimensi *tube* terlebih dahulu. *Trial* dilakukan menggunakan data pada Tabel 1 yang bersumber dari buku *Process Heat Transfer* oleh D. Q. Kern [12].

**Tabel 1.** Data spesifikasi *tube heat exchanger* untuk *trial*

| OD (inch) | BWG   | Ketebalan Dinding | ID (inch) | Flow Area per Tube (inch <sup>2</sup> ) | Permukaan per lin ft, ft <sup>2</sup> /ft |        | Weight per lin ft, lb steel |
|-----------|-------|-------------------|-----------|---|---|--------|-----------------------------|
|           |       |                   |           |   | Outside                                   | Inside |                             |
| 1 1/2     | 8     | 0,165             | 1,17      | 1,075                                   | 0,3925                                    | 0,3063 | 2,57                        |
|           | 9     | 0,148             | 1,20      | 1,14                                    |   | 0,3152 | 2,34                        |
|           | 10    | 0,134             | 1,23      | 1,19                                    |   | 0,3225 | 2,14                        |
|           | 11    | 0,120             | 1,26      | 1,25                                    |   | 0,3299 | 1,98                        |
|           | 12    | 0,109             | 1,28      | 1,29                                    |   | 0,3356 | 1,77                        |
|           | 13    | 0,095             | 1,31      | 1,35                                    |   | 0,3430 | 1,56                        |
|           | 14    | 0,083             | 1,33      | 1,40                                    |   | 0,3492 | 1,37                        |
|           | 15    | 0,072             | 1,36      | 1,44                                    |   | 0,3555 | 1,20                        |
|           | 16    | 0,065             | 1,37      | 1,47                                    |   | 0,3587 | 1,09                        |
|           | 17    | 0,058             | 1,38      | 1,50                                    |   | 0,3623 | 0,978                       |
| 18        | 0,049 | 1,40              | 1,54      |   | 0,3670                                    | 0,831  |                             |

Data dimensi *tube* yang dipilih dalam *trial*, kemudian digunakan dalam perhitungan jumlah *tube*. Perhitungan jumlah *tube* dilakukan dengan menggunakan Persamaan 6 berikut.

$$N_T = \frac{A}{a'' \times L} \tag{6}$$

Keterangan:

$N_T$  = Jumlah *tube*

$A$  = Luas permukaan perpindahan panas (ft<sup>2</sup>)

$a''$  = *Surface per lin ft* (ft/ft<sup>2</sup>)

$L$  = Panjang *tube*

Hasil perhitungan jumlah *tube* tersebut kemudian disesuaikan sehingga didapatkan jumlah *tube* standar yang mengacu pada buku *Process Heat Transfer* oleh D. Q. Kern [4].

Spesifikasi dimensi *shell* didapatkan melalui penyesuaian hasil nilai *trial* spesifikasi *tube*. Data yang dibutuhkan dalam penentuan spesifikasi dimensi *shell* di antaranya adalah jenis susunan *pitch*, ukuran diameter luar *tube*, dan jumlah *pass* fluida yang melalui sehingga didapatkan hasil pembacaan diameter dalam *shell* dengan bantuan buku *Process Heat Transfer* oleh D. Q. Kern [12].

**Tabel 2.** *Layout tube sheet susunan square pitch*

| 1 ½ inch OD tubes on 1 7/8 inch square pitch |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| Shell ID (inch)                              | 1-P | 2-P | 4-P | 6-P | 8-P |
| 12   | 16  | 16  | 12  | 12  | -   |
| 13 ¼   | 22  | 22  | 16  | 16  | -   |
| 15 ¼   | 29  | 29  | 25  | 24  | 22  |
| 17 ¼   | 39  | 39  | 34  | 32  | 29  |
| 19 ¼   | 50  | 48  | 45  | 43  | 39  |
| 21 ¼   | 62  | 60  | 57  | 54  | 50  |
| 23 ¼   | 78  | 74  | 70  | 66  | 62  |
| 25   | 94  | 90  | 86  | 84  | 78  |

Evaluasi perpindahan panas dilakukan untuk mengetahui kinerja proses pemanasan dari alat. Perhitungan diawali dengan melakukan perhitungan  $G_s$  untuk fluida *steam* pada *shell*.

$$G_s = \frac{W_s}{a_s} \tag{7}$$

Keterangan:

$G_s$  = *Mass velocity per cross section area shell* (lb/jam.ft<sup>2</sup>)

$W_s$  = Laju alir fluida panas *shell side* (lb/jam)

$a_s$  = *Flow area shell side* (ft<sup>2</sup>)

Nilai  $G_s$  tersebut kemudian digunakan untuk perhitungan mencari bilangan Reynold pada sisi *shell*.

$$NRe = \frac{D_e \times G_s}{\mu} \tag{8}$$

Keterangan:

$NRe$  = Bilangan Reynold fluida dalam *shell*

$D_e$  = Diameter ekivalen pada *shell side* (ft)

Gs = Mass velocity per cross section area pada shell side (lb/J.ft<sup>3</sup>)  
 μ = Viskositas fluida (cps)

Perhitungan nilai laju alir massa fluida pada sisi tube (Gt) dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$Gt = \frac{Wt}{at} \quad (9)$$

Keterangan:

Gt = Mass velocity per cross section area tube (lb/jam.ft<sup>2</sup>)  
 Wt = Laju alir fluida panas tube side (lb/jam)  
 at = Flow area tube side (ft<sup>2</sup>)

Niai bilangan Reynold dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$NRe = \frac{Di \times Gt}{\mu} \quad (10)$$

Keterangan:

NRe = Bilangan Reynold fluida dalam shell  
 Di = Diameter ekivalen pada tube side (ft)  
 Gt = Mass velocity per cross section area pada tube side (lb/J.ft<sup>3</sup>)  
 μ = Viskositas fluida (cps)

Koefisien perpindahan panas konveksi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$hi = JH \times \frac{k}{De} \times \left( \frac{Cp \times \mu}{k} \right) \times \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right) \quad (11)$$

Keterangan:

hi = Koefisien perpindahan panas inside (BTU/jam.ft<sup>2</sup>.°F)  
 JH = Faktor perpindahan panas  
 De = Diameter ekuivalen pada shell side (ft)  
 k = Thermal conductivity fluida pada shell (BTU/jam.ft<sup>2</sup>.°F)  
 μW = Viskositas fluida shell side pada temperatur Tc (lb/jam.ft)

Temperatur dinding tube dicari terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan berikut.

$$Tw = tc + \frac{\frac{ho}{\phi_s}}{\frac{ho}{\phi_t} + \frac{ho}{\phi_s}} (Tc - tc) \quad (12)$$

Keterangan:

Tw = Temperatur pada dinding tube (°F)  
 Tc = Temperatur pada dinding shell (°F)  
 tc = Temperatur rata-rata pada tube (°F)  
 φs = Viskositas rasio fluida dalam shell  
 φt = Viskositas rasio fluida dalam tube

Koefisien perpindahan panas konveksi inside pada outside diameter dapat dihitung dengan Persaman 13.

$$\frac{h_{io}}{\phi_t} = \frac{h_i}{\phi_t} \times \frac{ID}{OD} \quad (13)$$

Keterangan:

$h_{io}$  = Koefisien perpindahan panas konveksi *inside* pada *outside diameter* (BTU/jam.ft<sup>2</sup>.°F)

$h_i$  = Koefisien perpindahan panas *inside* (BTU/jam.ft<sup>2</sup>.°F)

ID = *Inside Diameter* (in)

OD = *Outside Diameter* (in)

Nilai koreksi koefisien perpindahan panas dapat dicari melalui perhitungan berikut.

$$\text{shell side} = \frac{h_o}{\phi_t} \times \phi_s \quad (14)$$

$$\text{tube side} = \frac{h_{io}}{\phi_s} \times \phi_t \quad (15)$$

Persamaan (14) dan Persamaan (15) memiliki keterangan sama seperti persamaan sebelumnya.

*Clean Overall Heat Transfer Coefficient* adalah koefisien panas menyeluruh ketika awal penggunaan *heat exchanger* sehingga alat masih bersih. Secara umum, nilai UC ditentukan oleh besarnya tahanan konveksi  $h_o$  dan  $h_{io}$ . Sedangkan, tahanan konduksi diabaikan karena sangat kecil apabila dibandingkan dengan tahanan konveksi.

$$UC = \frac{h_{io} \times h_o}{h_{io} + h_o} \quad (16)$$

Keterangan:

$U_c$  = *Clean overall heat transfer coefficient* (BTU/jam.°F)

$h_o$  = Koefisien perpindahan panas konveksi *outside* (BTU/jam.ft<sup>2</sup>.°F)

*Dirty Overall Coefficient* merupakan koefisien perpindahan panas menyeluruh setelah terjadi pengotoran pada *heat exchanger*. Secara umum, nilai  $U_D$  lebih kecil daripada nilai  $U_c$ .

$$U_D = \frac{Q}{A \times \Delta t} \quad (17)$$

Keterangan:

$U_D$  = *Design/dirty overall heat transfer coefficient* (BTU/jam.ft<sup>2</sup>)

$\Delta t$  = LMTD terkoreksi (°F)

$$D = \frac{UC - UD}{UC \times UD} \quad (18)$$

Keterangan:

$R_d$  = *Dirt factor* (jam.ft<sup>2</sup>.°F/BTU)

UC = *Clean overall heat transfer coefficient* (BTU/jam.°F)

UD = *Design/dirty overall heat transfer coefficient* (BTU/jam.ft<sup>2</sup>)

Perhitungan *pressure drop* pada sisi *shell* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta P_s = \frac{f \times Gt \times L \times n}{5,22 \times 10^{10} \times D \times s \times \phi t} \quad (19)$$

Keterangan:

$\Delta P_s$  = Pressure pada *shell side* (psi)

$f$  = Friction factor (ft<sup>2</sup>/in)

$s$  = Specific gravity

$D$  = Diameter dalam *shell* (ft)

Sedangkan, untuk *pressure drop* total sisi *tube* dapat dihitung melalui penjumlahan antara *pressure drop tube side* dan *return pressure drop*.

$$\Delta P_t = \frac{f \times Gt \times L \times n}{5,22 \times 10^{10} \times D \times s \times \phi t} \quad (20)$$

$$\Delta P_r = \frac{4n \times v^2}{s \times 2g} \quad (21)$$

$$\Delta P_T = \Delta P_t + \Delta P_r \quad (22)$$

Keterangan:

$f$  = Friction factor (ft<sup>2</sup>/in)

$n$  = Jumlah lintas *tube* (*pass*)

$D$  = Diameter dalam *tube* (ft)

$\Delta P_T$  = Total pressure pada *tube side* (psi)

$\Delta P_t$  = Pressure drop pada *tube side* (psi)

$\Delta P_r$  = Return pressure drop (psi)

Nilai *pressure drop* memiliki ketentuan yang harus dipenuhi, yaitu nilai  $\Delta P$  harus bernilai <2 psi apabila fluida yang dialirkan memiliki fase gas, sedangkan untuk fluida yang berfase cair maka nilai  $\Delta P$  perlu memiliki nilai <10 psi. Apabila nilai *pressure drop* tersebut tidak dipenuhi, perlu dilakukan proses *trial* kembali untuk didapatkan nilai yang sesuai [12].

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan melalui langkah-langkah di atas, didapatkan data perhitungan desain *Preheater Crude Phthalic* yang disajikan dalam Tabel 3. *Preheater Crude Phthalic Anhydride* berfungsi untuk menaikkan temperatur *Crude Phthalic Anhydride* dari 150°C menjadi 210°C dengan memanfaatkan kelebihan *steam* 30 bar sebagai fluida pemanasnya sebelum *Crude Phthalic Anhydride* masuk ke *Ageing Tank* (RE-3310). *Preheater* memiliki luas permukaan perpindahan panas sebesar 125 ft<sup>2</sup> atau lebih dari 120 ft<sup>2</sup> sehingga disarankan untuk menggunakan *heat exchanger* berjenis *Shell and Tube*. *Shell and Tube Heat Exchanger* tersusun atas sejumlah *tube* dengan fungsi sebagai tempat aliran fluida yang berada di dalam *shell* berbentuk cangkang silinder [13]. Perpindahan panas terjadi dari *tube* menuju *shell* atau sebaliknya, *shell* ke *tube* [14].

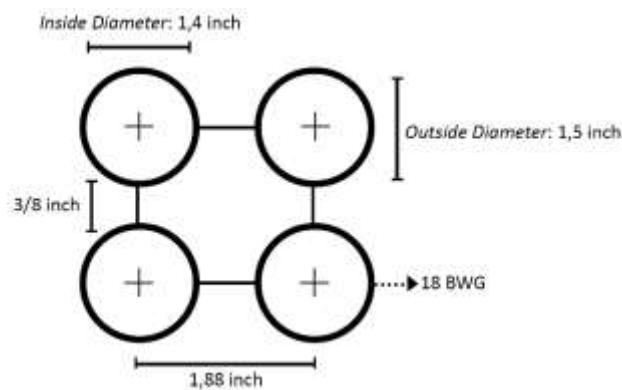
*Tube* pada *Shell and Tube Heat Exchanger* disusun dengan menggunakan aturan baku tertentu [15]. Bentuk susunan *tube* disebut *pitch* atau jarak terpendek antara pusat *tube* yang satu dengan pusat *tube* yang lain yang saling berdekatan [16]. Penampang *tube Shell and Tube Heat Exchanger Pitch Preheater Crude Phthalic Anhydride* didesain dengan susunan berbentuk *square*. *Square pitch* dipilih karena dapat memberikan beberapa keuntungan, di antaranya



mempermudah dalam pembersihan *preheater* secara mekanik, baik untuk penanganan fluida *fouling*, dan menyebabkan *pressure drop* yang rendah pada bagian *shell* ketika dialiri fluida sehingga proses perpindahan panas dapat terjadi secara optimal [12].

**Tabel 3.** Dimensi *Preheater Crude Phthalic Anhydride* menggunakan perhitungan berdasarkan buku *Process Heat Transfer* oleh D. Q. Kern [12].

| Spesifikasi   | Nilai  | Satuan              |
|---|--------|---------------------|
| <b>Tube: Crude Phthalic Anhydride</b>                 |        |                     |
| <i>Outside Diameter</i>                               | 1,5    | inch                |
| <i>Inside Diameter</i>                                | 1,4    | inch                |
| Panjang (L)   | 1,6    | m                   |
| BWG   | 18     |                     |
| <i>Pitch (P<sub>T</sub>)</i>                          | 1,88   | Inch                |
| <i>External Surface per Linear Foot of Pipe (a'')</i> | 0,3925 | ft <sup>2</sup> /ft |
| <i>Flow Area (a')</i>                                 | 1,54   | Inch                |
| <i>Equivalent Diameter (De)</i>                       | 0,09   | ft                  |
| Jarak antar Tube (C')                                 | 3/8    | inch                |
| Jumlah Tube (N <sub>T</sub> )                         | 62     | buah                |
| <b>Shell: Steam</b>                                   |        |                     |
| <i>Inside Diameter (ID)</i>                           | 21,25  | inch                |
| <i>Baffle Spacing (B)</i>                             | 12     | inch                |
| Jumlah Baffle   | 5      | buah                |



**Gambar 1.** Desain representatif susunan *square pitch* pada tube *Preheater Crude Phthalic Anhydride* di PT Petrowidada berdasarkan hasil *trial* Tabel 1.

Dalam prosesnya, *steam* sebagai fluida panas akan masuk pada bagian *shell*, sedangkan *Crude Phthalic Anhydride* akan dialirkan pada bagian *tube* karena fluida dingin berupa *Crude Phthalic Anhydride* memiliki viskositas dan kemungkinan impuritis yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan *steam* sehingga akan mempermudah pembersihan *preheater* melalui *mechanical cleaning tube*. Dalam memanaskan *Crude Phthalic Anhydride* sebanyak 10.865 kg/jam dibutuhkan aliran *steam* 30 bar sebesar 664,714 kg/jam yang masuk dan keluar pada sisi berlawanan atau *counter current*. Aliran jenis *counter current* dapat membantu transfer panas dengan lebih baik apabila dibandingkan dengan aliran searah atau parallel [17]. Di

samping itu, penempatan *Crude Phthalic Anhydride* yang memiliki laju alir lebih besar dibandingkan dengan *steam* ditempatkan pada sisi *tube* dengan diameter lebih kecil bertujuan untuk meningkatkan nilai bilangan *Reynold* serta membuat aliran menjadi lebih turbulen. Peningkatan nilai bilangan *Reynold* akan berbanding lurus dengan peningkatan koefisien perpindahan panas [18]. Koefisien perpindahan panas yang meningkat dapat berpengaruh pada proses pertukaran fluida antara *Crude Phthalic Anhydride* dan *steam* menjadi lebih efisien.

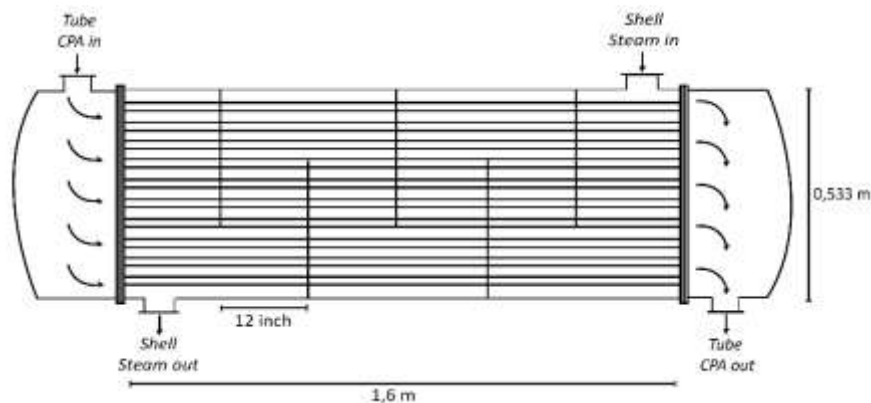
Jenis material *preheater* yang disarankan untuk bagian *tube* adalah *Stainless Steel 316L* karena memiliki kekuatan yang baik apabila dikontakkan dengan berbagai senyawa asam [19]. Melalui penggunaan jenis material *Stainless Steel 316L*, diharapkan *preheater* dapat memiliki *lifetime* yang lama karena tahan terhadap kandungan *Benzoic Acid* dan *Phthalic Acid* di dalam *Crude Phthalic Anhydride*. Jenis material yang digunakan pada bagian *shell* adalah *Carbon Steel SA-238 Grade C* karena kuat dalam kondisi temperatur tinggi, yaitu hingga 600°F, dan bersifat ekonomis [5]. Ketahanan pada temperatur tinggi tersebut tepat digunakan pada bagian *shell* karena *steam* yang dialirkan memiliki temperatur 235,708°C atau 456,27°F.

Perhitungan desain *preheater* ini menggunakan asumsi bahwa *Crude Phthalic Anhydride* sama dengan *Phthalic Anhydride* untuk melakukan pendekatan dalam perhitungan. Dimensi *tube* yang digunakan dalam *preheater* dapat diketahui dengan melakukan perhitungan  $\Delta T_{LMTD}$  terlebih dahulu. Nilai  $\Delta T_{LMTD}$  yang didapatkan adalah sebesar 89,69°F. *Steam* dan *Phthalic Anhydride* yang merupakan *medium organics* sehingga memiliki rentang nilai koefisien perpindahan panas ( $U_D$ ) sebesar 50-100 BTU/J.ft<sup>2</sup>.°F [12]. Nilai koefisien perpindahan panas yang digunakan pada perhitungan desain *preheater* ini adalah 100 BTU/J.ft<sup>2</sup>.°F. Nilai koefisien perpindahan panas dan  $\Delta T$  digunakan untuk menghitung nilai luas perpindahan panas ( $A$ ). *Tube Preheater Crude Phthalic Anhydride* yang digunakan memiliki ukuran diameter luar 1,5 inch dengan diameter dalam 1,4 inch serta ketebalan 18 BWG (*Birmingham Wire Gauge*). Ukuran diameter *tube* tersebut dipilih dengan memerhatikan viskositas *Crude Phthalic Anhydride* yang cukup tinggi, yaitu 0,7018 cps pada temperatur rata-rata 356°F sehingga aliran fluida dingin tidak terhambat selama proses terjadi. Panjang *tube preheater* adalah sebesar 1,6 meter yang dinilai ekonomis untuk diletakkan pada lokasi yang telah direncanakan karena memiliki ruang sepanjang 3 meter. Berdasarkan hasil perhitungan, jumlah *tube* standar yang diperlukan dalam *preheater* ini adalah sebanyak 62 buah sehingga didapatkan nilai koefisien perpindahan panas sesungguhnya sebesar 98,22 BTU/J.ft<sup>2</sup>.°F.

*Preheater Crude Phthalic Anhydride* memiliki *shell* berdiameter 21,25 inch. Selain itu, *preheater* ini juga dilengkapi dengan *baffle* berjumlah 5 buah berjarak 12 inch satu sama lain. Pemasangan *baffle* pada *heat exchanger* bertujuan agar didapatkan aliran silang di dalam tabung pada bagian *shell* dan untuk mengarahkan fluida agar mengalir secara zig-zag ketika melewati bundel *tube* serta berfungsi untuk mengurangi getaran [20]. Oleh karena itu, pemasangan *baffle* pada *heat exchanger* dapat meningkatkan laju perpindahan panas yang terjadi dan mampu menurunkan tekanan pada bagian *shell* dalam *heat exchanger* [20]. Selain itu, *baffle* juga menghasilkan pencampuran fluida menjadi lebih baik dan meningkatkan turbulensi serta menaikkan nilai *pressure drop* pada bagian *shell* [16].

Hasil perhitungan kelayakan desain *Preheater Phthalic Anhydride* ditinjau dari parameter *fouling factor* dan *pressure drop* ( $\Delta P$ ). *Fouling factor* menunjukkan nilai hambatan perpindahan panas karena terdapat faktor pengotor di dalam *heat exchanger* [21]. *Fouling*

*factor* perlu diperhitungkan dalam proses desain *heat exchanger* dengan sebagai bentukantisipasi terjadinya penumpukan kotoran dan kerak dengan sebuah tahanan akibat dari gesekan antara fluida dengan dinding *tube* [22]. Nilai *fouling factor* dipengaruhi oleh beberapa hal, di antaranya jenis fluida, temperatur fluida, jenis *tube*, kecepatan aliran, dan lama operasi. Waktu operasi dapat memengaruhi nilai faktor pengotor karena lapisan pengotor tersebut akan bertambah seiring dengan pertambahan durasi waktu penggunaan alat untuk proses terjadi. Lapisan pengotor yang semakin bertambah dapat menurunkan kinerja *preheater* karena terjadi peningkatan tahanan termal yang berdampak pada penurunan tingkat efektivitas perpindahan panas [23]. Penurunan tingkat efektivitas perpindahan panas terjadi karena terdapat penurunan luas bidang kontak antara fluida dingin dan fluida panas akibat penebalan pengotor yang terus semakin lama menjadi semakin bertambah di dalam sisi *tube* [24]. Oleh karena itu, perlu dipastikan bahwa nilai  $\Delta RD$  dalam desain berada dalam nilai *range* rendah sehingga impuritis yang timbul selama masa operasi dapat terakomodasi. Berdasarkan data PT Petrowidada, nilai *fouling factor* referensi adalah sebesar  $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$  atau  $0,0088 \text{ BTU}/\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{F}$  dan didapatkan nilai RD hasil perhitungan adalah sebesar  $0,0092 \text{ BTU}/\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{F}$ . Berdasarkan peninjauan *fouling factor*, *preheater* memenuhi kriteria evaluasi kelayakan alat penukar panas karena memiliki nilai  $\Delta RD$  sebesar 4% atau masih berada di bawah rentang  $\Delta 10\%$  RD minimum. Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa *heat exchanger* dapat memenuhi kebutuhan transfer panas.



**Gambar 2.** Desain representatif *Preheater Crude Phthalic Anhydride* di PT Petrowidada berdasarkan hasil *trial* perhitungan Tabel 1 dan Tabel 2.

Selain *fouling factor*, parameter lain yang memengaruhi kelayakan kinerja *Preheater Crude Phthalic Anhydride* adalah *pressure drop* ( $\Delta P$ ). *Pressure drop* merupakan penurunan tekanan yang terjadi pada alat proses. Ketika *pressure drop* bernilai tinggi, terdapat kemungkinan terjadi sumbatan pada aliran fluida sehingga terjadi penghambatan laju massa. Nilai *pressure drop* ideal pada *heat exchanger* adalah sebesar kurang dari 2 psi untuk fase gas dan kurang dari 10 psi pada fase liquid [12]. Berdasarkan perhitungan, nilai *pressure drop* pada *Preheater Crude Phthalic Anhydride* adalah sebesar 3,1268 psi untuk *Crude Phthalic Anhydride* dan  $3 \times 10^{-5}$  psi untuk *steam*. Dengan demikian, desain *Preheater Crude Phthalic Anhydride* dengan panjang 1,6 meter, *tube* berdiameter luar 1,5 inch, diameter dalam 1,4 inch yang dipilih dapat dan layak untuk digunakan dalam pemanasan *Crude Phthalic Anhydride* sebelum fluida tersebut masuk ke dalam *Ageing Tank* (RE-3310).

Implementasi *Crude Preheater Phthalic Anhydride* dapat membantu menurunkan kebutuhan fluida pemanas *Ageing Tank* (RE-3310), berupa TH-Oil, dari 74.766,5 kg/jam menjadi 47.065,5 kg/jam. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, pemasangan *Preheater Crude Phthalic Anhydride* dapat menurunkan kebutuhan energi untuk proses peningkatan temperatur TH-Oil, fluida yang digunakan sebagai media pemanas *Crude Phthalic Anhydride* pada *Ageing Tank* (RE-3310), di *Furnace* hingga 37% karena alat tersebut telah membantu menghemat energi sebesar 1.125.337 BTU/jam.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil desain *Preheater Crude Phthalic Anhydride* di PT Petrowidada melalui perhitungan *heat exchanger*, didapatkan hasil desain yang sesuai adalah jenis *Shell and Tube Heat Exchanger* dengan panjang pipa 1,6 meter, diameter luar pipa 1,5 inch, diameter dalam pipa 1,4 inch, dengan pipa berjumlah 62 buah disusun berbentuk *square*. Pipa-pipa tersebut akan diselubungi oleh *shell* berdiameter dalam 21,25 inch yang dilengkapi dengan 5 buah *baffle* dengan jarak antar *baffle* 12 inch.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar proses perhitungan desain alat dilengkapi dengan rangkaian simulasi proses menggunakan *software* pendukung seperti *Hysys* atau *Chemcad* sebagai langkah peninjauan kapabilitas kinerja alat dengan spesifikasi hasil perhitungan yang telah didapatkan.

#### REFERENSI

- [1] S. N. Damayanti, Y. Maryanty, dan M. A. Aris, "Penentuan Suhu Maksimal pada Proses Oksidasi Pthalic Anhydride PT Petrowidada", *Distilat Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 7, no. 2, hal. 601–605, 2021.
- [2] C. R. Dias, M. F. Portela, dan G. C. Bondt, "Oxidation of o-Xylene to Phthalic Anhydride over V2O5/TiO2 Catalysts", *Journal of Catalysis*, vol. 157, hal. 344–352, 1995.
- [3] J. A. Moulijn, M. T. Kreutzer, T. A. Nijhuis, dan F. Kapteijn, "Monolithic Catalysts and Reactors. High Precision with Low Energy Consumption", *Advances in Catalysis*, vol. 54, hal. 249–327, 2011.
- [4] G. T. Austin dan R. N. Shreve, "*Shreve's Chemical Process Industries*", Fifth Edition. New York: McGraw-Hill, 1984.
- [5] L. E. Brownell and E. H. Young, "*Process Equipment Design*", New York: John Wiley & Sons, 1959.
- [6] H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, dan S. A. Tassou, "Waste Heat Recovery Technologies and Applications", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 6, hal. 268–289, Juni 2018.
- [7] D. M. Himmelblau dan J. B. Riggs, "*Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*", Seven Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [8] F. Bless, C. Arpagaus, S. S. Bertsch, dan J. Schiffmann, "Theoretical Analysis of Steam Generation Methods - Energy, CO2 Emission, and Cost Analysis", *Energy*, vol. 129, hal. 114–121, 2017.
- [9] F. G. Chegini, L. Samiee, dan N. Rahmanian, "Energy Savings from Flash Steam Recovery: An Industrial Case Study", *Energy Conversion and Management: X*, vol. 19, hal. 1–13, Juli 2023.

- [10] M. Suharto, A. A. Wibowo, dan P. H. Suharti, "Optimasi pemurnian Etanol dengan Distilasi EKstraktif Menggunakan Chemcad", *Distilat Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 6, no. 1, hal. 1–7, 2020.
- [11] C. J. Geankoplis, "*Transport Processes and Unit Operations*", Englewood Cliffs: PTR Prentice Hall, 1983.
- [12] D. Q. Kern, "*Process Heat Transfer*", Singapura: McGraw-Hill Book Company, 1965.
- [13] S. Perumal, D. Sundaresan, R. Sivanraju, N. Tesfie, K. Ramalingam, dan S. Thanikodi, "Heat Transfer Analysis in Counter Flow Shell and Tube Heat Exchanger Using Design of Experiments", *Thermal Science*, vol. 26, no. 2, hal. 843–848, 2022.
- [14] K. Palanisamy dan P. C. Mukesh Kumar, "Experimental Investigation on Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Cone Helically Coiled Tube Heat Exchanger Using Carbon Nanotubes/Water Nanofluids", *Heliyon*, vol. 5, no. 5, Mei 2019.
- [15] A. F. Sari, "Shell and Tube Heat Exchanger Design pada Heater dengan Pemanas Steam pada Ethanolamine Plant", Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, 2019..
- [16] N. S. Mya, M. M. Thu, S. N. C. Htwe, M. P. S. Oo, M. K. S. Htay, dan M. N. L. Htet, "Baffle Design of Shell And Tube Heat Exchanger", *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, vol. 8, hal. 420–426, 2019.
- [17] I. H. Pratiwi dan L. Novianti, "Evaluasi Kinerja Heat Exchanger 11E-25 pada Preheating Section dalam Crude Distilling Unit I di PT Pertamina (Persero) Refinery Unit IV Cilacap", Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri bandung, 2012.
- [18] K. Umurani, R. A. Nasution, dan D. Irwansyah, "Perpindahan Panas Dan Penurunan Tekanan Pada Saluran Segiempat Dengan Rusuk V 90 Derajat", *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 4, no. 1, hal. 37–46, 2021.
- [19] S. C. Williams, "316 Stainless Steel Chemical Compatibility Chart", Industrial Specialties Mfg., Englewood, 2018.
- [20] M. R. Fahmi dan I. M. Arsana, "Pengaruh Baffle Cut Terhadap Efektivitas Penukar Panas Shell and Tube Jenis Triple-Segmental Baffle", *Jurnal Teknik Mesin Unesa*, vol. 10, no. 01, hal. 141–146, 2022.
- [21] H. N. Sari, I. M. Arsana, dan M. Hidayatulloh, "Pengaruh Fouling Factor Terhadap Performa Heat Exchanger Tipe Shell and Tube", *Jurnal Mekanova*, vol. 8, no. 1, hal. 55–61, 2022.
- [22] T. Yasunaga, T. Noguchi, T. Morisaki, dan Y. Ikegami, "Basic heat exchanger performance evaluation method on OTEC", *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, April. 2018.
- [23] N. J. Ainurrohmah dan P. H. Suharti, "Perhitungan Desain Pre-Heater dalam Perancangan Pabrik Handsanitizer Daun Kelor", *Distilat Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 1, hal. 245–253, 2022.
- [24] Y. A. Nugroho dan E. Febrianto, "Analisis Kinerja Mesin Band Saw Soft Mill Menggunakan Total Productive Maintenance pada PT Alis Jaya Ciptatama", *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 3, hal. 232–243, Juni. 2022.