

BAB IV

PEMBAHASAN DAN PERHITUNGAN

4.1. PEMBAHASAN

Vaccum pan / pan masak merupakan salah satu macam alat penukar kalor (*heat exchanger*). Alat tersebut digunakan untuk melakukan proses pertukaran kalor antara dua fluida, baik cair (panas atau dingin) maupun gas, dimana fluida ini mempunyai temperatur yang beda.

Pan masak yang ada di pabrik gula Madukismo menggunakan model kalandria dan jumlahnya sebanyak 13 buah.

Diketahui Data Teknis Bejana Uap Vakum *Pan* yang ada di PG.

Madukismo sebagai berikut :

1. Perencanaan tekanan kerja : 1,5 kgf/cm²
2. Perencanaan temperatur : 130 °C
3. Tekanan percobaan (padat air) : 3 kgf/cm²
4. Diameter dalam badan : 5.000 mm
5. Tebal plat badan : 16 mm
6. Diameter *bottom* : 4.600 mm
7. Tebal plat *bottom (steam duct)* : 16 mm
8. Tebal *tube plate* : 32 mm
9. Diameter pipa jiwa : 1.600 mm
10. Tebal plat pipa jiwa : 16 mm
11. Luas pemanas : 350 m²
12. Tinggi/panjang pipa pemanas : 1200 mm
13. Diameter pipa pemanas SUS TP 304 (out/in) : 101,6 mm / 97,6 mm
14. Jumlah pipa pemanas : 788 batang
15. Tinggi plat cover : 1.500 mm
16. Ukuran *steam dom savanger* : 16 mm
17. Tinggi total pan : 8.909 mm



Gambar 4.1 Calandria vakum *pan* di PG. Madukismo

4.1.1. Cara Kerja

Proses pemasakan gula yaitu menguapkan kembali nira kental dari stasiun penguapan sampai keadaan lewat jenuh di dalam *pan* vakum. Pemasakan nira dilakukan hingga timbul kristal gula. Sistem masakan menggunakan ABD dengan gula A sebagai produk sedangkan gula B dan D untuk bibit dan sebagian dilebur guna dimasak lagi.

Agar sukrosa tidak rusak akibat terkena panas tinggi dari uap panas, maka suhu didih yang diharapkan sekitar 65°C saat proses pemasakan. Dengan menggunakan tekanan sebesar vakum 65 mmHg. Hasil dari proses masakan pada *pan* vakum adalah campuran kristal gula dan *stroop*, kemudian dipisahkan di stasiun puteran. Sebelum dikemas gula didinginkan lebih dahulu di palung pendingin.

Berikut ini merupakan proses oprasional pada pan masak kalandria:

- *Afsluiter vaccum* dibuka (saluran atas sebelah kiri ada 2), bersamaan dengan dibukanya *afsluiter* air yang masuk kondensor sampai pan masak menunjukkan 65 mmHg.
- Buka *afsluiter* masuk nira / *stroop* sampai isi 150 HL, lalu tutup kembali. Isi nira dilihat dari kaca penglihat, sampai isi diatas pipa pemanas atau sampai isi dikaca no. 3.
- Buka kran / *afsluiter* uap setelah 2 jam lebih nira mendidih. Dicek kekentalannya dan bisa ditambah *stroop*. Sampai beberapa kali supaya ini sesuai (400 hl). Hal ini dicek berulang-ulang sampai butiran gula HK maksimal (berapa % sesuai standar). Setelah dicek butiran gulanya sesuai standar disetujui oleh masinis maka kristal gula dan larutan boleh diturunkan. Kemudian *afluiter* vakum ditutup dan buka kran gembos diatas tangki. Bersamaan dibuka tangkai pengeluaran gula masuk ke tangki pendingin.

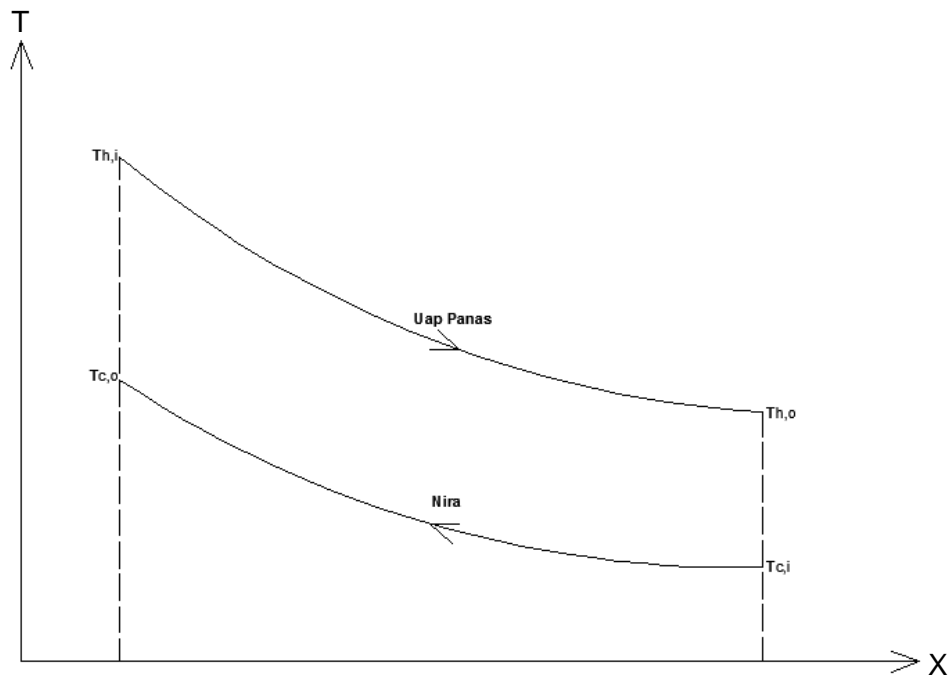
4.1.2. Analisa HE Pada Pan Masak di Madukismo

Dilihat dari cara kerja *pan* masak kalandria tersebut maka dapat dikelompokan alat penukar kalor tipe tertutup (*close type heat exchanger*) dimana fluida panas (uap panas) dan dingin (nira) tidak terjadi kontak secara langsung tetapi terpisahkan oleh dinding pipa. Dan juga merupakan tipe dinding pemisah tetap (*rekuperatif*) karena pada dinding pemisah tidak berputar.

Karena sudah diketahui suhu-suhunya dan luas pemanas / penampangnya dapat diketahui analisa perpindahan kalornya menggunakan LMTD.

4.2. PERHITUNGAN

Berdasarkan nilai temperatur yang diperoleh dari *pan* vakum tipe kalandria di PG. Madukismo, maka dapat digambarkan distribusi suhunya seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Distribusi suhu

Diketahui :

$T_{h,i}$	=	120 °C
$T_{h,o}$	=	90 °C
$T_{c,i}$	=	60 °C
$T_{c,o}$	=	70 °C

4.2.1. $LMTD_{CF}$

Log Mean Temperature Difference Cross Flow adalah rata-rata logaritmik dari perbedaan suhu antara aliran panas dan dingin disetiap akhir *exchanger*, dimana aliran fluida panas dan aliran fluida dingin mengalir dengan arah yang melintang.

4.2.1.1. Perhitungan LMTD Pada *Pan* Masak Calandria

Perhitungan ini menggunakan metode LMTD pada aliran kompleks. Metode pada aliran ini diasumsikan menggunakan metode $LMTD_{CF}$, karena pada aliran ini sulit untuk menentukan distribusi suhu pada penampang panas.

$$\begin{aligned} \text{Diketahui : } T_{h,i} &= 120 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{h,o} &= 90 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{c,i} &= 60 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{c,o} &= 70 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Maka :

$$LMTD_{CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} = 120 - 70 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} = 90 - 60 = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} LMTD_{CF} &= \frac{50 - 30}{\ln(50/30)} \\ &= 39,15 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

4.2.1.2. Perhitungan Faktor Koreksi (F) LMTD

Untuk alat penukar kalor *shell* dan *tube* dan aliran menyilang yang memiliki jumlah aliran/lintasannya lebih dari satu ataupun lebih (*multi-pass*), baik itu shell maupun susunan tube maka dalam hal ini nilai LMTD yang telah diperoleh harus dikoreksi dengan faktor koreksi (F).

- P adalah keefektifan temperature pada sisi fluida dingin.

$$\begin{aligned} P &= \frac{\Delta T_{\text{Tube}}}{\Delta T_{\text{Max}}} \\ &= \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \end{aligned}$$

$$= \frac{70 - 60}{120 - 60}$$

$$= 0,17$$

- R adalah rasio laju kapasitas energi panas.

$$R = \frac{\Delta T_{\text{Shell}}}{\Delta T_{\text{Tube}}}$$

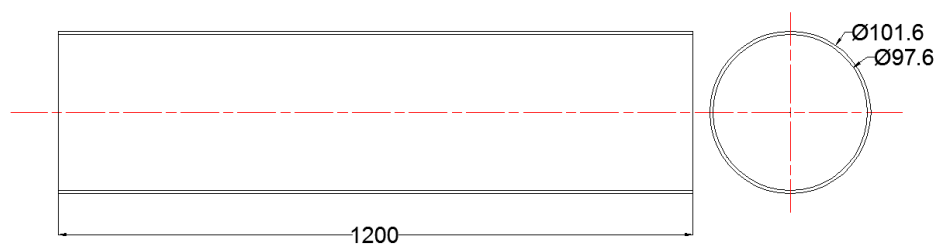
$$= \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{c,o} - T_{c,i}}$$

$$= \frac{120 - 90}{70 - 60}$$

$$= 3$$

Setelah diketahui nilai P dan R maka dapat diketahui nilai F dari grafik pada Gambar 2.34 Faktor koreksi penukar kalor satu luan, aliran melintang, kedua fluida tidak tercampur. Dari nilai P = 0,17 dan R = 3, didapatkan nilai F \approx 0,98 .

4.2.2. Luas Penampang Sisi *Tube* (A)



Gambar 4.3 Pipa pemanas

Diketahui :

- Diameter pipa = 97,6 mm
- Panjang pipa = 1200 mm
- Jumlah pipa = 788

Maka :

$$\begin{aligned}
 A &= (\pi \cdot D) \cdot L \cdot n \\
 A &= (\pi \cdot 97,6) \cdot 1200 \cdot 788 \\
 &= 289.939.345,3 \text{ mm}^2 \\
 &= 289,93 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

4.2.3. Perhitungan Perpindahan Panas

a. Mencari luas permukaan pipa

– Luas permukaan pipa sisi luar

$$\begin{aligned}
 r_o &= \frac{D_o}{2} = \frac{101,6}{2} = 50,8 \text{ mm} \\
 &= 0,0508 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_o &= 2\pi \cdot r_o \cdot L \\
 &= 2\pi \cdot 0,0508 \cdot 1,2 \\
 &= 0,38 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

– Luas permukaan pipa sisi dalam

$$\begin{aligned}
 r_i &= \frac{D_i}{2} = \frac{97,6}{2} = 48,6 \text{ mm} \\
 &= 0,0486 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_i &= 2\pi \cdot r_i \cdot L \\
 &= 2\pi \cdot 0,0486 \cdot 1,2 \\
 &= 0,367 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

b. Perpindahan panas konveksi

Dikarenakan tidak ada data tentang koefisien perpindahan panas konveksi (h) pada *pan* vakum dari pabrik, maka di persepsikan nilai $h_i = 200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ dan $h_o = 1500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (Incopera, 2011).

- Perpindahan panas konveksi sisi dalam

$$\begin{aligned} Q_{\text{Konveksi},i} &= h_i \cdot A_i \cdot \Delta T \\ &= 200 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} \cdot 0,367 \text{ m}^2 \cdot (120 - 60) \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 4.404 \text{ W} \end{aligned}$$

- Perpindahan panas konveksi sisi luar

$$\begin{aligned} Q_{\text{Konveksi},o} &= h_o \cdot A_o \cdot \Delta T \\ &= 1500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} \cdot 0,38 \text{ m}^2 \cdot (120 - 60) \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 34.200 \text{ W} \end{aligned}$$

c. Perpindahan panas radiasi

Nilai emisivitas dipresepsikan sebesar $\varepsilon = 0,85$ (Incopera, 2011). Dikarenakan tidak ada data pada *pan* vakum dari pabrik. Maka perpindahan panas radiasi :

$$T_o = 120 + 273 = 394 \text{ K}$$

$$T_i = 60 + 273 = 342 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{Radiasi}} &= \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_i \cdot (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4 \cdot 0,85 \cdot 0,367 \text{ m}^2 \cdot (393^4 - 342^4) \text{ K} \\ &= 179,95 \text{ W} \end{aligned}$$

Karena nilai perpindahan panas radiasi lebih kecil daripada perpindahan panas konveksi maka Q_{Radiasi} diabaikan.

d. Perpindahan panas konduksi

$$Q_{\text{Konduksi}} = -k \cdot A \cdot \Delta T / \Delta x$$

Untuk nilai laju perpindahan panas konduksi dipersepsikan sangat kecil. Karena nilai konduktivitas thermal tinggi disebabkan oleh material yang digunakan oleh pipa *tube* adalah jenis almunium (SUS TP 304) dan luas penampang (A) nilainya kecil. Kemudian nilai perbedaan temperatur ($T_{s,o}$ dan

$T_{s,i}$) tidak diketahui dan perubahan jarak dalam arah aliran panas (Δx) sangat kecil. Untuk nilai perpindahan panas konduksi dipersepsikan sangat kecil maka diabaikan.

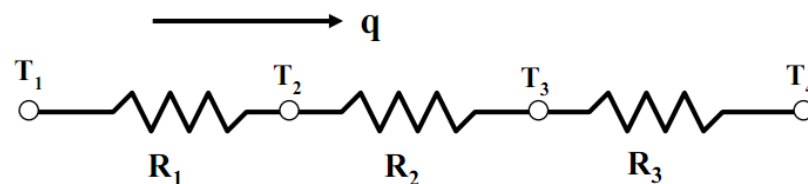
4.2.4. Koefisien Perpindahan Panas (U)

Koefisien perpindahan panas total didefinisikan sebagai koefisien hambatan termal total menuju perpindahan panas diantara dua fluida. Koefisien perpindahan panas total juga didefinisikan sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi dengan memperhitungkan hambatan diantara fluida yang dipisahkan oleh lapisan komposit dan dinding silinder.

Diketahui :

h_i	=	200 W/m ² .K
h_o	=	1500 W/m ² .K
D_i	=	97,6 mm
D_o	=	101,6 mm
L	=	1200 mm = 1,2 m

Dengan analogi listrik :



Gambar 4.4 Aliran panas dinyatakan dengan analogi listrik rangkaian seri.

$$R_1 = \frac{1}{h_o \cdot A_o}$$

$$R_2 = \text{Diabaikan}$$

$$R_3 = \frac{1}{h_i \cdot A_i}$$

Pada pan masak kalandria ini R_t , konduksi (R_2) diabaikan karena nilainya sangat kecil.

$$U_i \cdot A_i = \frac{1}{R_t}$$

$$R_t = R_1 + R_3$$

$$R_t = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{1}{h_o \cdot A_o}$$

Maka :

$$\begin{aligned} R_t &= \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{1}{h_o \cdot A_o} \\ &= \frac{1}{1500 \cdot 0,367} + \frac{1}{200 \cdot 0,38} \\ &= 0,0149 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_i &= \frac{1}{R_t \cdot A_i} \\ &= \frac{1}{0,0149 \cdot 0,367} \\ &= 182,87 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

4.2.5. Laju Perpindahan Kalor (Q)

$$\begin{aligned} \text{Diketahui : } U &= 182,87 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} \\ A &= 289,93 \text{ m}^2 \\ F &= 0,98 \\ \text{LMTD}_{\text{CF}} &= 39,15 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned} Q &= U \cdot A \cdot (F \cdot \text{LMTD}_{\text{CF}}) \\ &= 182,87 \cdot 289,93 \cdot (0,98 \cdot 39,15) \\ &= 2.034.199,12 \text{ W} \\ &= 2.034,19 \text{ kW} \end{aligned}$$