

# PENENTUAN CATU KALOR PADA PAN MASAK KALANDRIA DI PG. MADUKISMO YOGYAKARTA

Septyawan Raharjo  
 (20100130064)

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183  
 Email : septyawanraharjo@gmail.com

## Abstrak

*Pan* vakum tipe kalandria di PG. Madukismo digunakan untuk proses pemasakan nira agar menjadi kristal gula. Proses tersebut terjadi di stasiun masak. *Pan* vakum merupakan salah satu alat penukar kalor jenis *shell and tube* yang digunakan memanaskan nira pada sisi *tube* dan uap panas pada sisi *shell*. Belum ada nilai catu kalor ( $Q$ ) dari alat tersebut. Tujuan penelitian adalah melakukan perhitungan catu kalor pada *pan* vakum.

Perhitungan catu kalor *pan* vakum kalandria dapat menggunakan modus simulasi. Modus simulasi digunakan untuk menghitung nilai catu kalor dengan desain *pan* vakum yang sudah dibuat. Perhitungan menggunakan metode *log mean temperature difference* (LMTD). Data-data yang dibutuhkan yaitu temperature kedua fluida panas dan dingin (nira dan uap panas) sebesar  $T_{h,i} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{h,o} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{c,i} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{c,o} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dan laju aliran  $m_{nira} = 40,5\text{ kg/s}$ ,  $m_{uap\ panas} = 178\text{ kg/s}$ , serta perpindahan kalor konveksi  $h_i = 200\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $h_o = 1500\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Tujuan perhitungan yaitu menentukan nilai catu kalor ( $Q$ ).

Berdasarkan hasil perhitungan dengan modus simulasi dan metode LMTD diperoleh nilai catu kalor *pan* vakum kalandria sebesar 2.034.199,12 W. Dari hasil perhitungan dapat digunakan sebagai nilai standar *pan* vakum tersebut untuk bahan perbandingan dalam menjaga performa alat di kemudian hari.

**Kata Kunci** : *pan* vakum, catu kalor, fluida, modus simulasi, LMTD

## Abstract

*Vacuum Pan – Calandria in Madukismo sugar factory is used to change the syrup of raw sugar cane (juice) to sugar crystals by boiling it. That process is in evaporator station of vacuum pan. Vacuum Pan is a tank with a vacuum pump to process the heat transfer in the calandria tubes. It has no a heat supply value (Q), so it needs to be calculated.*

*The calculation of the Vacuum Pan - Calandria heat supply, can use simulation mode. It is used to calculate the value of heat supply for a vacuum pan design that has been made. The calculation uses the log mean temperature difference (LMTD) method, which need both data of hot and cold fluid of of  $T_{h,i} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{h,o} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{c,i} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{c,o} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . And the flow rate of  $m_{nira} = 40.5\text{ kg/s}$ ,  $m_{hot\ discharge} = 178\text{ kg/s}$  and convection heat transfer  $h_i = 200\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $h_o = 1500\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . The purpose of the calculation is to determine the value of heat supply (Q).*

*Based on the result of calculation with the simulation mode and LMTD method, the value of the Vacuum Pan – Calandria heat supply is 2.034.199,122 W. That calculation result can be used as a standard heat supply value of the vacuum pan to maintenance the performance of the device.*

**Keywords**: *vacuum pan, heat supply, fluid, simulation mode, LMTD*

## 1. Pendahuluan

Uap air telah lama digunakan manusia sebagai penunjang kebutuhan sehari-hari, begitupula pada kegiatan industri gula merupakan salah satu

contoh dimana uap air memegang peran penting bagi kelangsungan produksinya. Industri gula memerlukan uap untuk memasak nira mentah hasil perasan tebu menjadi gula.

Pabrik Gula Madukismo adalah salah satu pabrik gula tertua di

Indonesia dan satu-satunya pabrik gula dan alkohol/spiritus di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Pabrik Gula Madukismo berfungsi sebagai pemasok utama gula khususnya di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) dan sekitarnya.

Dalam produksi gula terdapat peralatan yang menunjang untuk menghasilkan gula yang berkualitas baik terutama pada *pan* masak. *Pan* masak merupakan alat yang digunakan dalam kondisi vakum (hampa udara) agar proses kristalisasi gula dapat terjadi dan mencegah kerusakan dari nira.

Sasaran utama dalam proses memasak di stasiun masakan (*Vacuum Pan*) di pabrik gula yaitu memasak dengan waktu seminim mungkin, namun menghasilkan gula semaksimal mungkin. Hasil dari produksi diharapkan seragam, pada ukuran yang diinginkan, bebas penggumpalan, tetap mudah mengalir dan dipisahkan dari sirup, serta membutuhkan sedikit air untuk pembilasan, mudah dikeringkan dan siap simpan.

Karena belum ada nilai *catu kalor* (*Q*) yang menjadi patokan dalam proses pemasakan nira pada *pan* vakum tipe Kalandria di PG. Madukismo maka perlu dilakukan perhitungan ini. Hasil dari perhitungan dapat dijadikan sebagai standar nilai *Q* pada saat proses pemasakan. Bila terjadi penurunan performa pada nilai *Q* dibandingkan hasil perhitungan maka perlu dilakukan pembersihan pada alat tersebut.

## 2. Tinjauan Pustaka

Menurut Indra (2013) bahwa stasiun masak merupakan tempat yang digunakan untuk proses lanjutan penguapan air dari nira kental yang dihasilkan oleh evaporator pada stasiun penguapan. Tujuannya untuk mengubah bentuk sukrosa dan zat terlarut dalam nira menjadi lewath jenuh sehingga sukrosa mengkristal. Proses tersebut terjadi pada alat yang bernama *pan* masak/vakum dan dilakukan pada tekanan vakum 60 – 65 mmHg dan suhu pemanasan sekitar 60 – 70 °C agar sukrosa tidak rusak. Proses pembentukan kristal gula pada dasarnya adalah penghilangan air dari

larutan sukrosa sehingga larut menjadi jenuh dan pada akhirnya mengalami pengkristalan.

Menurut Winarno (1997) bahwa pemisahan bahan padat berbentuk kristal dari suatu larutan atau lelehan disebut kristalisasi. Bila suatu larutan yang mengandung gula, misalnya sukrosa diuapkan, maka konsentrasinya akan meningkat dan proses akan terus berlangsung sehingga seluruh air menguap. Apabila keadaan tersebut tercapai dan pemanasan diteruskan, maka cairan yang ada bukan lagi terdiri dari air tetapi cairan sukrosa yang telah lebur.

Proses pemasakan (kristalisasi) merupakan suatu proses yang bertujuan untuk mengkristalkan sukrosa yang ada pada nira kental menjadi kristal-kristal gula dengan kehilangan gula yang seminimal mungkin dalam waktu singkat. Sehingga dengan demikian kerusakan sukrosa dapat dicegah, karena sukrosa ini akan mudah rusak pada suhu yang tinggi. Sesuai teori yang dikemukakan oleh Winarno (1997) bahwa titik lebur sukrosa adalah 160°C, sehingga apabila gula dipanaskan sampai melebihi suhunya maka akan terjadi karamelisasi.

### 2.1 Teori Dasar

Menurut Bizzy dan Setiadi (2013) bahwa tujuan dari alat penukar kalor terkait kontrol suatu sistem temperatur dengan menambahkan atau menghilangkan energi termal dari suatu fluida ke fluida lainnya.

### 2.2 Penukar Kalor dengan Metode LTMD

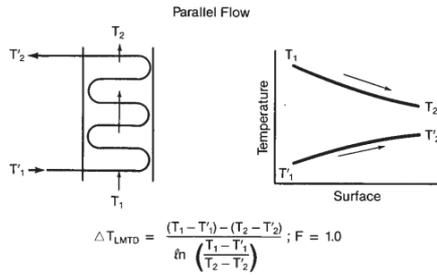
Dilihat dari aliran yang terjadi ada 2 aliran, yaitu: aliran sederhana dan aliran kompleks.

#### a. Metode LMTD pada aliran sederhana.

Pada aliran ini metode LMTD menggunakan :

- Metode LMTD<sub>PF</sub> (*Parallel Flow*)

*Parallel flow* adalah dimana aliran fluida panas dan aliran fluida dingin mengalir sejajar atau dengan arah yang sama. Yang dapat dijelaskan dengan gambar 1.

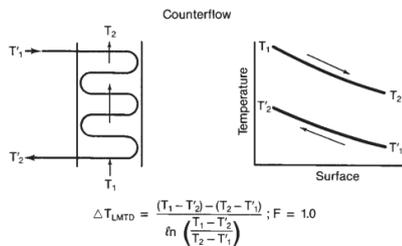


Gambar 1 LMTD<sub>PF</sub> (Parallel Flow)

Untuk laju perpindahan panasnya menggunakan rumus

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD_{PF} \quad (1)$$

➤ Metode LMTD<sub>CF</sub> (counter flow)  
 Counter flow adalah dimana aliran fluida panas dan aliran fluida dingin mengalir dengan arah yang berlawanan.



Gambar 2 LMTD<sub>CF</sub> (counter flow)

Untuk laju perpindahan panasnya menggunakan rumus 2.

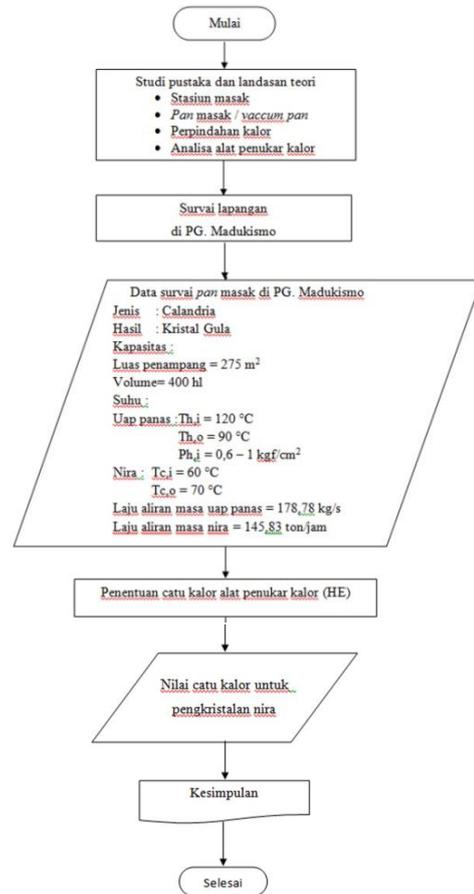
$$Q = U \cdot A \cdot LMTD_{CF} \quad (2)$$

b. Metode LMTD pada aliran kompleks

Metode pada aliran ini diasumsikan menggunakan metode LMTD<sub>CF</sub> (cross flow) karena pada aliran ini sulit untuk menentukan distribusi suhu pada penampang panas. Tetapi metode ini perlu dikoreksi dengan nilai F (faktor koreksi). Persamaan yang digunakan pada metode ini dapat dilihat pada gambar 3. Laju perpindahan panas pada metode LMTD<sub>CF</sub> menggunakan rumus 3.

$$Q = U \cdot A \cdot (F \cdot LMTD_{CF}) \quad (3)$$

### 3. Metode Penelitian



Gambar 3 Diagram alir perancangan

#### 3.1 Rencana Perhitungan / Desain Termal

1. Input data : Th<sub>i</sub>, Th<sub>o</sub>, T<sub>ci</sub>, T<sub>co</sub>, h<sub>o</sub>, h<sub>i</sub>
2. Perhitungan LMTD

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

3. Luas permukaan  
 $A = (\pi \cdot D) \cdot L$
4. Menghitung koefisien perpindahan panas

$$U = \frac{1}{R_t \cdot A}$$

5. Menghitung dan menentukan koefisien perpindahan panas (h) konveksi / konduksi / radiasi.

- h<sub>kondensat</sub>
- h<sub>pendingin</sub>

6. Perhitungan faktor koreksi LMTD

$$F = \dots$$

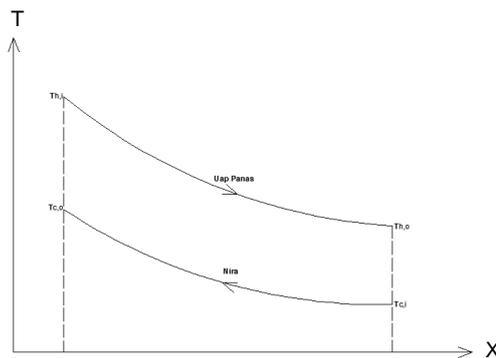
$$-P = \frac{\Delta T_{tube}}{\Delta T_{max}}$$

$$-R = \frac{\Delta T_{shell}}{\Delta T_{tube}}$$

7. Menghitung catu kalor  
 $Q = A \cdot U \cdot F \cdot LMTD_{CF}$
8. Menampilkan hasil perhitungan desain termal/catu kalor.

## 4. Hasil Dan Pembahasan

Berdasarkan nilai temperatur yang diperoleh dari pan vakum tipe kalandria di PG. Madukismo, maka dapat digambarkan distribusi suhunya seperti pada Gambar 4.



Gambar 4 Distribusi suhu

Diketahui :

- $T_{h,i} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{h,o} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{c,i} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{c,o} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

### 4.1. $LMTD_{CF}$

*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.

#### 4.1.1. 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.

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

Maka :

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

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

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

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

#### 4.1.2. 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.

$$P = \frac{\Delta T_{Tube}}{\Delta T_{Max}} = \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} = \frac{70 - 60}{120 - 60} = 0,17$$

- R adalah rasio laju kapasitas energi panas.

$$R = \frac{\Delta T_{Shell}}{\Delta T_{Tube}} = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{c,o} - T_{c,i}} = \frac{120 - 90}{70 - 60} = 3$$

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

#### 4.2. Luas Penampang Sisi Tube (A)



Gambar 5 Pipa pemanas

Diketahui :

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

Maka :

$$A = (\pi \cdot D) \cdot L \cdot n$$

$$A = (\pi \cdot 97,6) \cdot 1200 \cdot 788$$

$$= 289.939.345,3 \text{ mm}^2$$

$$= 289,93 \text{ m}^2$$

#### 4.3. Perhitungan Perpindahan Panas

- a. Mencari luas permukaan pipa  
– Luas permukaan pipa sisi luar

$$r_o = \frac{D_o}{2} = \frac{101,6}{2} = 50,8 \text{ mm}$$

$$= 0,0508 \text{ m}$$

$$A_o = 2\pi \cdot r_o \cdot L$$

$$= 2\pi \cdot 0,0508 \cdot 1.2$$

$$= 0,38 \text{ m}^2$$

- Luas permukaan pipa sisi dalam

$$r_i = \frac{D_i}{2} = \frac{97,6}{2} = 48,6 \text{ mm}$$

$$= 0,0486 \text{ m}$$

$$A_i = 2\pi \cdot r_i \cdot L$$

$$= 2\pi \cdot 0,0486 \cdot 1.2$$

$$= 0,367 \text{ m}^2$$

- 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, 2011:707).

- Perpindahan panas konveksi sisi dalam

$$Q_{\text{Konvksi},i} = h_i \cdot A_i \cdot \Delta T$$

$$= 200 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} \cdot 0,367 \text{ m}^2 \cdot (120 - 60) \text{ }^\circ\text{C}$$

$$= 4.404 \text{ W}$$

- Perpindahan panas konveksi sisi luar

$$Q_{\text{Konvksi},o} = h_o \cdot A_o \cdot \Delta T$$

$$= 1500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} \cdot 0,38 \text{ m}^2 \cdot (120 - 60) \text{ }^\circ\text{C}$$

$$= 34.200 \text{ W}$$

- c. Perpindahan panas radiasi

Nilai emisivitas dipresepsikan sebesar  $\epsilon = 0,85$  (Incopera, 2011:786). Dikarenakan tidak ada data pada *pan* vakum dari pabrik. Maka perpindahan panas radiasi :

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

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

$$Q_{\text{Radiasi}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A_i \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4 \cdot 0,85 \cdot 0,367 \text{ m}^2 \cdot (393^4 - 342^4) \text{ K}$$

$$= 179,95 \text{ W}$$

Karena nilai perpindahan panas radiasi lebih kecil daripada perpindahan panas konveksi, maka  $Q_{\text{Radiasi}}$  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 ( $\Delta x$ ) sangat kecil. Untuk nilai perpindahan panas konduksi dipersepsikan sangat kecil maka diabaikan.

#### 4.4. 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 :  $h_i = 200 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

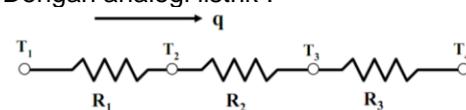
$$h_o = 1500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$D_i = 97,6 \text{ mm}$$

$$D_o = 101,6 \text{ mm}$$

$$L = 1200 \text{ mm} = 1,2 \text{ m}$$

Dengan analogi listrik :



**Gambar 7** 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.

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

$$R_t = R_1 + R_2$$

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

Maka :

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

$$= \frac{1}{1500 \cdot 0,367} + \frac{1}{200 \cdot 0,38}$$

$$= 0,0149$$

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

$$= \frac{1}{0,0149 \cdot 0,367}$$

$$= 182,87 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

#### 4.5. Laju Perpindahan Kalor (Q)

Diketahui :

$$U = 182,87 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$A = 289,93 \text{ m}^2$$

$$F = 0,98$$

$$LMTD_{CF} = 39,15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Maka :

$$Q = U \cdot A \cdot (F \cdot LMTD_{CF})$$

$$= 182,87 \cdot 289,93 \cdot (0,98 \cdot 39,15)$$

$$= 2.034.199,12 \text{ W}$$

$$= 2.034,19 \text{ kW}$$

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan termal pada *pan* vakum jenis kalandria untuk proses kristalisasi gula, bahwa perancangan tersebut menggunakan modus simulasi dengan metode perhitungan LMTD (*Log Mean Temperature Difference*). Dilihat dari cara kerjanya digolongkan sebagai alat penukar kalor tipe tertutup dan dinding pemisah tetap (rekuperatif). Sedangkan jika ditinjau dari analisis thermal yang terjadi pada *tube* dan *shell* merupakan kondisi aliran kompleks (*cross flow*). Dengan mengetahui suhu-suhu pada kedua fluida (nira dan uap panas) sebesar  $Th,i = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Th,o = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Tc,i = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ , dan  $Tc,o = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Serta laju aliran  $m_{nira} = 40,5 \text{ kg/s}$ ,  $m_{uap\ panas} = 178 \text{ kg/s}$  dan perpindahan kalor konveksi  $h_i = 200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ,  $h_o = 1500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  untuk menghitung nilai catu kalor yang terjadi saat proses

kristalisasi pada *pan* vakum. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai catu kalor (Q) sebesar 2.034.199,122 W. Hasil perhitungan nilai catu kalor (Q) dapat digunakan sebagai nilai standar *pan* vakum bagi pabrik, guna menjaga performa mesin.

## 6. Saran

1. Perlu adanya pembukuan tentang data-data teknis dan thermal yang lebih lengkap pada alat penukar kalor tersebut. Terutama pada data thermalnya.
2. Hendaknya didalam badan vakum *pan* masak dihindari dari kotoran (kerak) yang diakibatkan oleh ikutnya bahan lain yang masuk bersama nira, yaitu dengan membersihkan semua kerak yang ada setiap kali akan digunakan untuk memasak. Sehingga semua nira yang ada didalam badan vakum *pan* akan dapat bersirkulasi seluruhnya.

## 7. Daftar Pustaka

1. Bizzy, I. & Setiadi, R. 2013. *Studi Perhitungan Alat Penukar Kalor Tipe Shell And Tube Dengan Program Heat Transfer Research Inc.*(HTRI). Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 13,No. 1:67-77
2. Incropera, Frank P. Dewitt, David P. Bergman, Theodore L. Lavine, Adrienne S. 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, seventh edition, John Wiley & Sons (Jefferson City) MPS Ltd.
3. Indra, Alfiandi. 2013. *Proses Produksi Gula Pasir (Gula Dari Tebu)*. Diakses pada tanggal 03 Agustus 2015 dari <http://indralfiandi.blogspot.com/2013/08/proses-produksi-gula-tebu-gula-pasir.html>
4. Winarno, F.G (1997). *Kimia Pangan dan Gizi*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
5. Winarno, F.G (1997). *Teknologi Tepat Guna Membuat Gula Kelapa Kristal*. Kanisius. Yogyakarta.