

# Analisis Pindah Panas Konduksi dan Konveksi pada Heat Exchanger Evaporator Efek Ganda pada Pengolahan Nira Tebu

## Analysis of Heat Transfer Conduction and Convection on Heat Exchanger Double Effect Evaporator on Sugarcane Juice Processing

Khoirul Anam As Syukri<sup>1\*</sup>, Dony Perdana<sup>1</sup>, Moch. Izza Maulana Sulthon<sup>1</sup>, Sumardi Hadi Sumarlan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Maarif Hasyim Latif, Sidoarjo, Indonesia.

<sup>2</sup> Jurusan Keteknikan Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia.

Email\*): anam\_assyukri@dosen.umaha.ac.id

Received:  
8 November 2022

Revised:  
10 August 2023

Accepted:  
10 September 2023

Published:  
27 September 2023

DOI:  
10.29303/jrpb.v11i2.221

ISSN 2301-8119  
e-ISSN 2443-1354

Tersedia online di  
<http://jrpb.unram.ac.id/>

**Abstract:** Heat transfer occurs due to differences in temperature contained in an object. In this study only discussed about heat transfer by conduction, and by convection (inside and outside the tube). The purpose of this study was to determine the value of conduction and convection heat transfer in the heat exchanger of the sugarcane juice evaporation process using a dual effect evaporator and its effect on the rate of evaporation. The method used through observation and experimentation on the heat exchanger contained in the second tube evaporator. The materials used were 50 liters of sugar cane juice in the 1 effect tube and 26 liters of the effect tube 2. Experiments and data collection in the form of temperature, pressure, and volume were carried out 3 times. Each repeat process was carried out at 5.2 hours under vacuum. The temperature and pressure data were recorded every 10 minutes. In addition, the plate thickness, plate type, material contact surface area and characteristics of the processed material were determined. Furthermore, the data is substituted in several heat transfer equations to get the value. Based on the results of the study, the overall heat transfer coefficient value of the convection heat transfer is 35.98 w / m<sup>2</sup>K. Meanwhile, the total heat transfer from convection and conduction to the heat exchanger is 4656.6 watts. This heat transfer value can cause the evaporation rate of sugarcane juice to effect 2 of 1.03 liters / hour.

**Keywords:** double effect evaporator; heat transfer; conduction; convection

**Abstrak:** Pindah panas terjadi karena perbedaan suhu yang terdapat pada suatu benda. Pada penelitian ini hanya dibahas mengenai pindah panas secara konduksi, dan secara konveksi (dalam dan luar tube). Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui nilai pindah panas konduksi dan konveksi pada heat exchanger dari proses evaporasi nira tebu menggunakan evaporator efek ganda dan pengaruhnya terhadap laju penguapan. Metode yang digunakan melalui pengamatan dan eksperimen pada heat exchanger yang terdapat pada evaporator tabung kedua. Bahan yang digunakan berupa nira tebu sebanyak 50 liter pada tabung efek 1 dan 26 liter pada tabung efek 2. Eksperimen dan pengambilan data berupa suhu, tekanan, dan volume dilakukan sebanyak 3 kali ulangan. Setiap proses ulangan dilakukan pada waktu 5,2 jam dalam kondisi vakum. Pencatatan data suhu dan tekanan dilakukan setiap 10 menit. Selain itu dilakukan penentuan ketebalan plat, jenis plat, luas permukaan kontak bahan, dan karakteristik bahan yang diproses. Selanjutnya data tersebut disubstitusikan dalam beberapa persamaan pindah panas untuk mendapatkan besaran nilainya. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan nilai overall heat transfer coefficient dari pindah panas konveksi sebesar 35,98 w/m<sup>2</sup>K. Sedangkan pindah panas total dari konveksi dan konduksi pada heat exchanger adalah sebesar 4656,6 watt. Nilai pindah panas tersebut dapat menyebabkan laju evaporasi nira tebu pada efek 2 sebesar 1,03 liter/jam.

**Kata kunci:** evaporator *double effect*; konduksi, konveksi; pindah panas;

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Aktifitas mendasar pada proses evaporasi adalah sistem termal untuk menghasilkan kalor dalam proses penguapan bahan. Hal tersebut disebabkan penguapan merupakan salah satu proses konversi energi menjadi panas untuk menghasilkan uap air melalui proses perubahan fasa. Perubahan fasa yang terjadi, yaitu dari cair ke gas, perubahan entalpi sistem adalah panas laten, dalam kasusnya yang terkait dengan penguapan. Pada perubahan suhu sederhana, derajat variasi entalpi sesuai dengan kapasitas panas pada sistem tekanan konstan (Rodriguez et al., 2015). Sehingga salah satu item paling penting dalam proses penguapan menggunakan evaporator adalah perancangan sistem termal yang baik, terutama pada heat exchanger. Item tersebut juga sangat mempengaruhi besar kecilnya biaya yang dibutuhkan dalam proses evaporasi (Ali et al., 2021), selain item jumlah efek (A. Sorour, 2015). Perencanaan sistem termal melibatkan proses pindah panas yang perlu diketahui besaran nilainya. Sehingga analisis pindah panas penting dilakukan untuk mengetahui seberapa efektif heat exchanger itu dapat bekerja dan berapa banyak uap air yang dihasilkan.

Jenis evaporator yang digunakan adalah evaporator efek ganda (*double effect*) dengan sistem vakum (Lppm & Soetedjo, 2009). Evaporator efek ganda memungkinkan penghematan dari sisi energi. Hal ini disebabkan karena uap atau steam yang dihasilkan dari efek 1 (ruang proses 1) dapat digunakan kembali untuk melakukan proses evaporasi pada bahan di efek 2. Sehingga terjadi *recovery system* dalam penggunaan energi (Riadi et al., 2021). Dalam konduksi (Wijaya et al., 2019), energi perlahan-lahan berdifusi melalui titik suhu yang lebih tinggi ke titik suhu yang lebih rendah dengan adanya media penghantar dan tanpa adanya perpindahan partikel penyusun, sedangkan konveksi terjadi dengan adanya gerakan media transmisi (Holdsworth & Simpson, 2016).

Dari hasil analisis pindah panas dapat diketahui hubungannya dengan banyaknya uap yang dihasilkan dalam proses evaporasi. Besar kecilnya pindah panas dalam *heat exchanger* akan berpengaruh pada sedikit banyaknya uap yang dapat dihasilkan. Sehingga dapat diketahui seberapa efektif heat exchanger yang telah dirancang dan digunakan.

Penelitian serupa tentang analisis pindah panas dilakukan oleh Storia (2016), namun fokus pada pengaruh °Brix terhadap pindah panas. Penelitian lain juga dilakukan pada kondensor (Fauziyyah, 2015), pengaruh perbedaan material terhadap pindah panas (Ma'shum et al., 2012), Analisa *Heat Exchanger* Jenis *Sheel and Tube* Dengan Sistem *Single Pass* (Sutowo, 2012). Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya tanpa menghubungkan antara hasil nilai pindah panas dengan pengurangan volume.

### Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai pindah panas konduksi dan konveksi pada heat exchanger efek 2 yang dihasilkan oleh uap panas dari proses evaporasi efek 1.

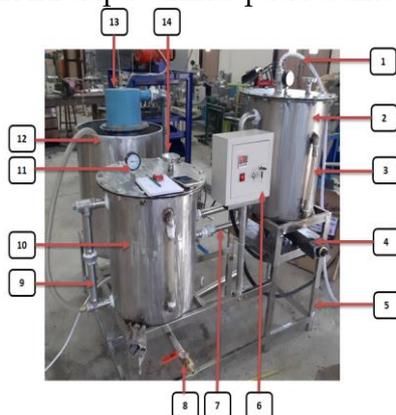
## METODE PENELITIAN

### Alat dan Bahan

Alat yang digunakan untuk menunjang penelitian diantaranya unit mesin evaporator vakum *double effect*, kompor YUNDAI YANG-5A, stopwatch, sensor termokopel digital, 2 boiler thermometer, heat exchanger, 2 manometer, mistar, jangka sorong, penggiling tebu, saringan nira, dan box styrofoam. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya nira tebu hitam varietas BL (Bululawang), air, gas LPG (Liquified Petroleum Gas) 12 kg, natrium benzoat, dan kapur tohor (CaO).

### Unit Mesin Evaporator Efek Ganda

Spesifikasi mesin terdiri dari 2 tabung proses yaitu tabung efek 1 berdiameter 40 cm dan tinggi 50 cm, dengan kapasitas 50 liter. Efek 2 memiliki diameter dan tinggi yang sama dengan efek 1, namun di dalam efek 2 terdapat heat exchanger sehingga kapasitas dari efek 2 sebesar 30 liter. Heat exchanger pada efek 2 berdiameter 40 cm dengan tinggi 25 cm, memiliki 28 lubang tube sheet dengan diameter 2,54 cm. Tebal plat yang digunakan pada konstruksi mesin dan heat exchanger adalah stainless steel ketebalan 3 mm. Rancangan evaporator efek ganda yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



**Gambar 1.** Kontruksi mesin evaporator efek ganda: (1) Valve input bahan, (2) Ruang proses/tabung efek 1, (3) Indikator volume bahan efek 1, (4) Kompor (pemanas), (5) Rangka, (6) Panel control, (7) Pipa saluran bahan efek 1 ke efek 2, (8) Valve output bahan, (9) Saluran udara dari ruang proses menuju pompa, (10) Ruang proses efek 2, (11) Manometer efek 2, (12) Chamber/wadah air sirkulasi pompa, (13) *Water Jet*, (14) Boiler Thermometer uap efek 2



**Gambar 2.** Kontruksi heat exchanger tampak bawah pada efek 2

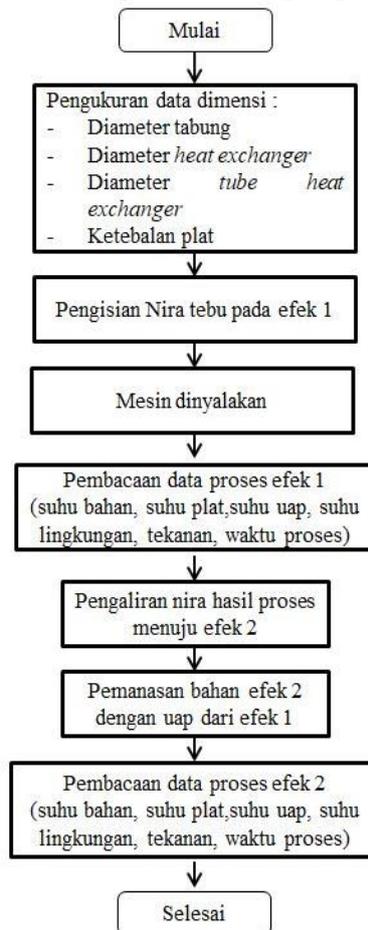
### Metode Pengambilan Data

Metode yang digunakan dalam pengambilan data adalah melalui pengamatan dan eksperimen pada *heat exchanger* yang terdapat pada evaporator tabung kedua. Pengambilan data dilakukan dengan 3 kali ulangan. Setiap proses ulangan dilakukan pada waktu 5,2 jam. Pencatatan data suhu dan tekanan dilakukan setiap 10 menit. Untuk bahan yang diproses digunakan nira tebu yang didapatkan dari proses penggilingan tebu hitam. Setiap proses digunakan sebanyak 50 liter pada efek 1, dan rata-rata 26,5 liter pada efek 2. Dilakukan juga pencatatan terhadap tekanan vakum dari pompa vakum 1 HP setiap 10 menit sekali. Setelah beberapa data pendukung didapatkan, maka dapat dilakukan perhitungan melalui beberapa persamaan yang dijelaskan pada bagian selanjutnya.

Data pendukung yang diperlukan untuk menunjang penentuan nilai pindah panas diantaranya suhu bahan, suhu uap, suhu lingkungan, ketebalan plat, jenis plat, luas permukaan kontak bahan, dan karakteristik bahan yang diproses. Pengambilan data suhu

digunakan menggunakan thermocouple pada titik dalam dan luar tube untuk mengukur suhu bahan dan material plat. Hasil pengukuran tertampil pada display dari *box control*. Selain itu digunakan 2 boiler thermometer analog. Pertama digunakan untuk mengukur uap input pada *heat exchanger* dan kedua ditempatkan pada luar *tube heat exchanger* untuk mengukur besarnya suhu uap yang dihasilkan. Sementara untuk pengambilan data suhu lingkungan digunakan termometer ruangan. Data berupa dimensi dilakukan pengukuran menggunakan mistar dan jangka sorong.

Berikut diagram alir dari satu kali proses/ulangan pengambilan data pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir pengambilan data dalam satu kali proses

### Pindah Panas Pada Heat Exchanger (Efek 2)

Perpindahan panas atau kalor dapat didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperatur pada daerah tersebut. Perhitungan laju perpindahan panas membutuhkan perhitungan total pada area permukaan yang terkena panas. Oleh karena itu, dibutuhkan beberapa data, seperti data temperatur fluida yang masuk dan keluar, koefisien perpindahan panas total, laju perpindahan panas total, dan data-data lain yang mendukung untuk analisis. Ada tiga bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Namun untuk pindah panas secara radiasi tidak dijelaskan pada penelitian ini.

#### a. Perpindahan Panas Secara Konduksi

Perhitungan pindah panas secara konduksi dilakukan untuk menentukan besarnya energi yang berhasil ditransfer dalam *heat exchanger*. Persamaan laju perpindahan panas konduksi satu dimensi pada dinding datar dengan arah pindah panas  $90^\circ$  dikenal dengan persamaan (hukum) *Fourier's Law*, yaitu (Darmanto et al., 2005):

$$q_k = - \frac{k \times A \times \Delta T}{x} \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

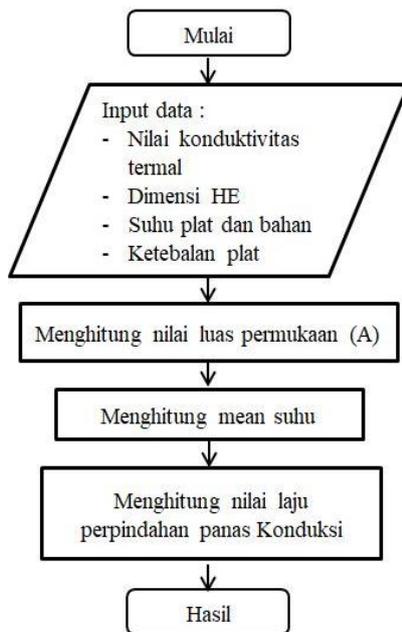
$q_k$  : laju perpindahan panas (watt)

$k$  : konduktivitas panas (W/m<sup>o</sup>K)

$A$  : luasan penampang tegak lurus dengan arah perpindahan panas (m<sup>2</sup>)

$\frac{\Delta T}{x}$  : gradient temperatur

Tanda minus adalah konsekuensi bahwa panas berpindah dari lokasi yang bertemperatur tinggi ke yang lebih rendah. Berikut diagram alir penentuan nilai konduksi terdapat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir perhitungan nilai pindah panas konduksi

**b. Perpindahan Panas Secara Konveksi**

Penentuan pindah panas secara konveksi dilakukan dengan 2 perhitungan, yaitu konveksi dalam *tube* dan konveksi luar *tube*.

1. Pindah panas dalam *tube* ( $h_i$ )

Untuk menghitung nilai koefisien perpindahan panas secara konveksi didalam *tube* dapat dilakukan dengan Persamaan 2 (Bonan, 2019):

$$h_i = \frac{Nu_D + k_f}{D_i} \dots\dots\dots(2)$$

dimana:

$h_i$  : koefisien konveksi luar *tube* (W/m<sup>2</sup>.K)

$Nu_D$  : nusselt number

$K$  : konduktivitas thermal (W/m.K)

$D_i$  : diameter dalam tube (m)

Sebelum disubstitusikan pada Persamaan 2, dilakukan penentuan jenis aliran yaitu laminar dan turbular. Aliran laminar terjadi jika nilai dari  $Re_D < 2300$  sedangkan aliran turbulen terjadi jika nilai  $Re_D \geq 2300$ . Untuk membedakan kedua aliran tersebut, digunakan batasan dengan menggunakan *Reynold Number* dengan menggunakan Persamaan 3:

$$Re = \frac{D \times v \times \rho}{\mu} \dots\dots\dots(3)$$

dimana:

$Re_D$  : *Reynold Number*

$\rho$  : massa jenis aliran (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  : kecepatan aliran (m/s)

$D$  : diameter dalam tube (m)

$\mu$  : viskositas absolut (Ns/m<sup>2</sup>)

Pada aliran laminar, berlaku untuk *Nusselt Number* didapat dari Persamaan 4a :

$$Nu_D = \frac{h_i \times D}{k} = 4.36 \text{ (} q'' = \text{konstan)} \dots\dots\dots(4a)$$

Jika pada seluruh permukaan perpindahan panas sama :

$$Nu_D = \frac{h_i \times D}{k} = 3.66 \text{ (} T_s = \text{konstan)} \dots\dots\dots(4b)$$

Pada aliran turbulan untuk nusselt number didapatkan dari Persamaan 5 :

$$Nu_D = 0,023 \times Re^{4/5} \times Pr^n \dots\dots\dots(5)$$

$Nu_D$  : *Nusselt Number*

$Re_D$  : *Reynold Number*

$Pr$  : *Prandtl Number*

$n$  : 0.4 untuk proses *heating* ( $T_s > T_m$ ) dan 0.3 untuk proses *cooling* ( $T_s < T_m$ )

Setelah ditentukan nilai dari nusselt number, konduktivitas thermal, dan diameter dalam, maka dapat disubstitusikan pada persamaan (2) untuk nilai koefisien perpindahan panas secara konveksi didalam *tube*.

### 2. Pindah panas luar *tube* ( $h_o$ )

Tahapan pertama adalah menentukan nilai persamaan *Reynold Number* (Persamaan 3) dan *Prandtl Number*. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai *Nusselt Number* dengan Persamaan 6 (Frank P. Incropera's et. al., 2017) :

$$Nu_D = C1 \times Re^m \times Pr^{0,36} \times \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4} \dots\dots\dots(6)$$

Dengan ketentuan, ( $N_L > 20$  ;  $0,7 < Pr < 500$  ;  $1000 < Re_{D,max} < 2 \times 10^6$ )

$$Nu_D = C1 \times Re^m \times \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/3} \dots\dots\dots(7)$$

Dengan ketentuan, ( $N_L > 10$  ;  $Pr < 0,7$  ;  $2000 < Re_{D,max} < 40000$ )

Pada tahap selanjutnya adalah dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai *Jacob Number* ( $Ja$ ) Kalor Laten Penguapan ( $h'_{fg}$ ). Penentuan *Jacob Number* menggunakan Persamaan 8 :

$$Ja = \frac{c_{p_f} \times (T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} \dots\dots\dots(8)$$

Hasil nilai *Jacob Number* digunakan untuk menentukan nilai kalor laten penguapan ( $h'_{fg}$ ).

Setelah mendapatkan beberapa hasil diatas, dapat dihitung nilai koefisien perpindahan panas secara konveksi diluar *tube*, dengan Persamaan 9 :

$$h_o = \frac{Nu \times k}{D_o} \dots\dots\dots(9)$$

$h_i$  = koefisien konveksi di luar tube (W/m<sup>2</sup>.K)

$Nu$  = *nusselt number*

$k$  = konduktivitas *thermal* (W/m.K)

$D_o$  = diameter luar *tube* (m)

### 3. Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan

Koefisien pindah panas keseluruhan merupakan hasil perhitungan dari koefisien konveksi dalam ( $h_i$ ) dan luar ( $h_o$ ) *tube*. Persamaan umum untuk menghitung *overall heat transfer coefficient* yaitu (Saputra & Ferdian, 2020):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R''_{f,o} + \frac{r_o}{k} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \times R''_{f,i} + \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \times \left(\frac{1}{h_i}\right)} \dots\dots\dots(10)$$

$r_o$  = jari-jari luar (m)

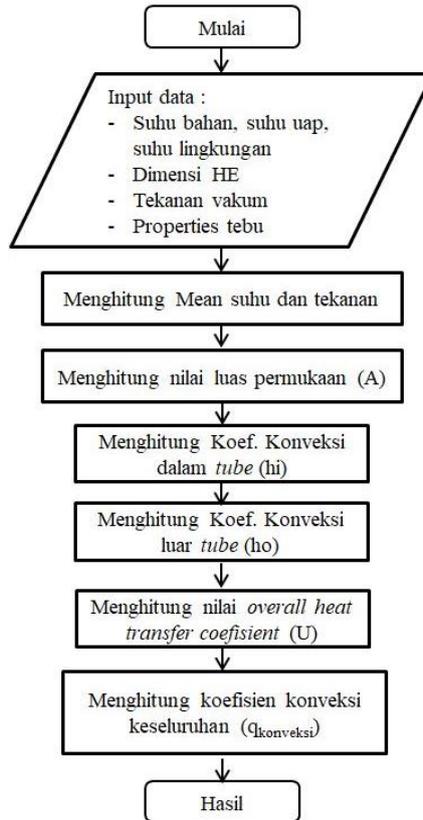
$r_i$  = jari-jari dalam (m)

$R_{f,o}$  = Konstanta retensi *fouling factor*

Tahap terakhir adalah mensubstitusikan hasil dari beberapa variabel diatas pada persamaan berikut :

$$q_{konveksi} = U \times A \times \Delta T \dots\dots\dots(11)$$

Berikut diagram alir dari proses penentuan nilai pindah pindah panas konveksi pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir proses penentuan nilai konveksi keseluruhan ( $q_{konveksi}$ )

**c. Pengukuran laju Penguapan**

Laju penguapan pada alat evaporator menunjukkan laju kuantitas air yang berhasil dievaporasi (diuapkan) menjadi uap persatuan waktu (jam). Pengukuran didapat dengan pengamatan pada ruang evaporasi, yaitu selisih volume bahan masuk dengan bahan tersisa. Selisih bahan ini merupakan jumlah bahan yang berhasil dievaporasi. Penguapan tersebut menghasilkan *steam* yang dapat digunakan pada proses pemanasan. Perhitungan laju evaporasi dapat menggunakan Persamaan 12 (Tyas et al., 2017) (Supriatna, 2008) :

$$\frac{\delta M}{\delta T} = \frac{m1-m2}{\theta} \dots\dots\dots(12)$$

Di mana:

- $\frac{\delta M}{\delta T}$  = laju evaporasi,
- m1 = kadar air awal bahan
- m2 = kadar air akhir bahan
- $\theta$  = lamanya/waktu proses evaporasi

**d. Properties Nira Tebu**

Propertis dari nira sangat bergantung pada konsentrasi (B) dan temperatur (t). Dalam (Storia, 2016) memberikan Persamaan 13, 14 dan 15 di bawah ini.

Density

$$\rho = 1000 \left( 1 + \frac{B(B+200)}{54000} \right) \left[ 1 - 0,036 \left( \frac{t-20}{160-t} \right) \right] \dots\dots\dots(13)$$

Spesific Heat Capacity

$$Cp = 4,1868 - B (0,0297 - 4,6x10^{-5}P) + 7,5x10^{-5}P t \dots\dots\dots(14)$$

Thermal Conductivity

$$k = (1 - 0,54B) \cdot \left[ 0,561 + 0,206 \left( \frac{t}{100} \right) - 0,0943 \left( \frac{t}{100} \right)^2 - 0,007746 \left( \frac{t}{100} \right)^3 \right] \dots\dots\dots(15)$$

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Analisis Pindah panas (*heat exchanger*)**

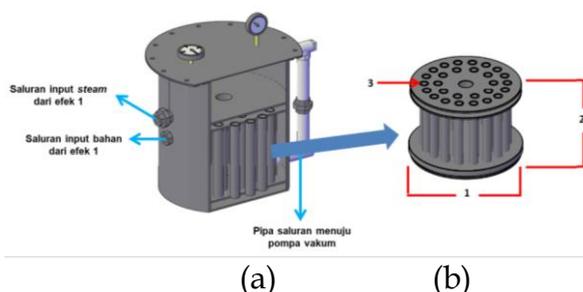
Perhitungan pindah panas pada penelitian ini ditujukan pada bagian *heat exchanger*. Karena analisis yang digunakan adalah pindah panas secara konveksi dan konduksi. Pada analisis pindah panas secara konveksi akan dianalisis dari dalam dan luar *tube heat exchanger* yang sumber panasnya berasal dari aliran uap panas hasil evaporasi efek 1. Sedangkan analisis pindah panas konduksi, dilakukan pada area *heat exchanger* yang kontak langsung dengan bahan.

**a. Luas permukaan area *heat transfer* pada *heat exchanger***

Tipe *Heat exchanger* yang digunakan adalah tipe *shell and tube* seperti yang telah dijelaskan pada pembahasan awal. Berdasarkan pengamatan dan pengukuran dari HE yang digunakan, didapatkan dimensi dari HE sebagai berikut :

1. R<sub>besar</sub> = 40 cm ;
2. Tinggi = 25 cm ;
3. r<sub>kecil</sub> atau r<sub>dalam</sub> = 1,27 cm ;
4. r<sub>besar</sub> atau r<sub>luar</sub> = 1,57 cm
5. Tebal plat HE = 3 mm

Selanjutnya dilakukan perhitungan pada luas permukaan dari HE dengan bentuk seperti pada Gambar 6. Hasil perhitungan dari luas permukaan dari area pindah panas adalah sebesar 1,507 m<sup>2</sup>.



**Gambar 6.** (a) konstruksi HE dalam efek 2 (b) konstruksi dan skema dimensi *heat exchanger*

**b. Perhitungan Pindah panas Konduksi pada *Heat Exchanger***

Variabel perhitungan meliputi konduktivitas termal, luas permukaan, dan gradien suhu. Besar konduktivitas termal dari *steinless steel* adalah 45 w/m°C, luas permukaan 1,507 m<sup>2</sup>, dan gradien suhu sebesar 2 °C. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, besar pindah panas konduksi pada *heat exchanger* adalah sebesar 4521 watt. Artinya pindah panas yang terjadi secara konduksi di dalam sistem *heat exchanger* sebesar 4521 watt.

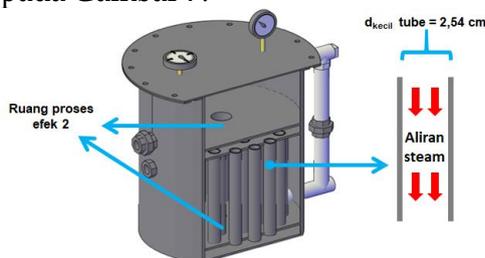
Perhitungan pindah panas pada penelitian ini hanya dilakukan pada konstruksi *heat exchanger* karena memungkinkan untuk dilakukan perhitungan pindah panas konveksi dan konduksi. Hal tersebut membuat luasan area permukaan dari pindah panas konduksi menjadi lebih kecil dari seluruh kapasitas evaporator. Sehingga nilai pindah panas konduksi yang didapatkan tergolong masih rendah (Sasmita et al., 2018). Dalam (Michaleris, 2014) menyebutkan bahwa faktor terbesar yang mempengaruhi nilai pindah panas adalah luas permukaan. Ketika luas permukaan besar, maka nilai pindah panas yang dihasilkan akan semakin besar. Faktor lainnya adalah kecilnya selisih suhu dari *heat exchanger*. Ketika selisih suhu rendah, maka peningkatan suhu menjadi tidak signifikan, yang berarti bahwa hanya terjadi pindah panas konduksi dalam jumlah yang rendah. Selain itu, ketebalan dari material

yang digunakan untuk *shell* akan mempengaruhi laju pindah panas yang terjadi pada *heat exchanger*. Ketebalan dari pipa untuk *shell* mewakili jarak yang ditempuh panas sebelum mencapai bahan yang akan dipanaskan. Ketika laju panas lebih lama, maka panas yang diterima bahan akan lebih kecil dan lebih rendah. Sehingga perbaikan konstruksi dan pemilihan material dari perancangan *heat exchanger* perlu dilakukan kajian ulang untuk mencapai nilai optimalnya.

**c. Perhitungan pindah panas Konveksi**

**- Perhitungan Nilai panas Konveksi dalam Tube ( $h_i$ )**

Laju perpindahan panas konveksi didapat dengan menggunakan (hukum) *newton's law of cooling* atas dasar kasus perpindahan panas pada evaporator *double effect* menggunakan sistem aliran paksa. Karena *steam* hasil penguapan di efek 1 ditarik secara paksa melewati *tube* pada *heat exchanger* menggunakan pompa vakum. Sehingga *steam* akan membawa energi panas melewati *tube* pada *heat exchanger* dan menimbulkan panas pada *heat exchanger*. Selanjutnya akan memanaskan bahan pada efek 2. Laju aliran *steam* pada *heat exchanger* bergerak secara vertikal sesuai dengan konstruksi dari mesin. Berikut merupakan skema pola aliran dalam *tube* dijelaskan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Pola aliran *steam* dalam *tube heat exchange*

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan besar nilai koefisien konveksi dalam *tube* rata-rata adalah sebagai berikut:

**Tabel 1.** Hasil perhitungan pindah panas dalam tube pada HE

$T_i$ (°C)	$T_o$ (°C)	<i>Reynolds</i> <i>Number</i> ( <i>Re</i> )	<i>Nusselt</i> <i>Number</i> ( <i>Nu</i> )	$h_i$ ( $w/m^2 \cdot ^\circ C$ )
62	61,7	4167,56	15,65	514,6

Berdasarkan hasil pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa suhu dalam *tube* ( $T_i$ ) rata-rata sebesar 62 °C dan suhu diluar *tube* rata-rata 61,7 °C. Diasumsikan bahwa kecepatan udara penyedotan pompa vakum adalah 3 m/s. Selanjutnya ditentukan bilangan *Reynolds Number* dan didapatkan sebesar 4167,56. Bilangan *Reynold* diatas 2300 ( $Re > 2300$ ) sehingga aliran termasuk turbulen. Penentuan *Reynolds Number* menggunakan persamaan 3. Penentuan jenis aliran akan menentukan persamaan yang digunakan dalam melakukan perhitungan selanjutnya. Tahapan selanjutnya adalah menentukan *Nusselt Number* dan didapatkan nilai sebesar 15,65. Persamaan untuk aliran turbulen seperti pada persamaan 5. Setelah diketahui nilai dari *Nusselt Number* maka dapat dilakukan perhitungan besarnya pindah panas konveksi didalam *tube* ( $h_i$ ). Perhitungan pindah panas dalam *tube* menggunakan persamaan 2, dan didapatkan nilai pindah panas konveksi sebesar 514,6  $w/m^2 \cdot ^\circ K$ .

**- Perhitungan pindah panas konveksi luar tube ( $h_o$ )**

Pindah panas diluar *tube* merupakan laju panas yang terjadi di ruang proses efek 2. Panas dari *heat exchanger* akan diterima oleh bahan berupa fluida ketika dipanaskan dalam ruang proses efek 2. Konveksi pada bagian ini adalah bentuk pindah panas yang terjadi antara *heat exchanger* dengan fluida (nira tebu). Pada perhitungan  $h_o$  sangat ditentukan oleh besarnya

tekanan pada ruang proses. Tekanan tersebut akan digunakan dasar dalam penentuan suhu penguapan ( $T_{sat}$ ) dari nira tebu.

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan dari tekanan rata-rata pada efek 2 adalah sebesar -57,85 CmHg. Tekanan tersebut menghasilkan nilai suhu penguapan sebesar 64,2 °C Selanjutnya dilakukan perhitungan beberapa variabel pendukung lainnya, diantaranya Massa jenis ( $\rho$ ), *Specific heat* ( $C_{p_i}$ ), dan *Thermal Conductivity* ( $k$ ) (Persamaan 11,12,13).

**Tabel 2.** Nilai variabel pendukung perhitungan  $h_o$

Variabel	Nilai
Kalor laten ( $H_{fg}$ )	2351,4 kJ/kg
Massa jenis ( $\rho$ )	985,67 kg/m <sup>3</sup> ,
<i>Specific heat</i> ( $C_{p_i}$ ) pada suhu 62,94 °C	4,1827 KJ/kg.K
<i>Thermal Conductivity</i> ( $k$ ) pada suhu 62,94 °C	0,66094 w/m <sup>2</sup> .K
Prandtl ( $Pr$ ) pada suhu 62,94 °C	2,86
Absolute viscosity ( $\mu_i$ ) pada suhu 62,94 °C	450,344 x 10 <sup>-6</sup> N.s/m <sup>2</sup>

Dari beberapa variabel pada Tabel 2 dapat digunakan untuk menentukan nilai *Jacob Number* ( $Ja$ ) Kalor Laten Penguapan ( $h'_{fg}$ ). Hasil perhitungan *Jacob number* didapatkan sebesar 0,00421. Hasil nilai *Jacob Number* digunakan untuk menentukan nilai kalor laten penguapan ( $h'_{fg}$ ) yang menunjukkan kalor laten penguapan sebesar 2358,21 kJ/kg.

Perhitungan selanjutnya menentukan nilai *Nusselt number* seperti menggunakan persamaan 7. Besar *nusselt number* dari perhitungan adalah 2713,65. Hasil dari perhitungan menunjukkan bahwa nilai konveksi diluar *tube* adalah sebesar 4569,57 w/m<sup>2</sup>.K. Maka dapat diketahui bahwa besarnya koefisien konveksi yang terjadi di luar *tube* (didalam ruang proses efek 2) adalah sebesar 4569,57 w/m<sup>2</sup>.K.

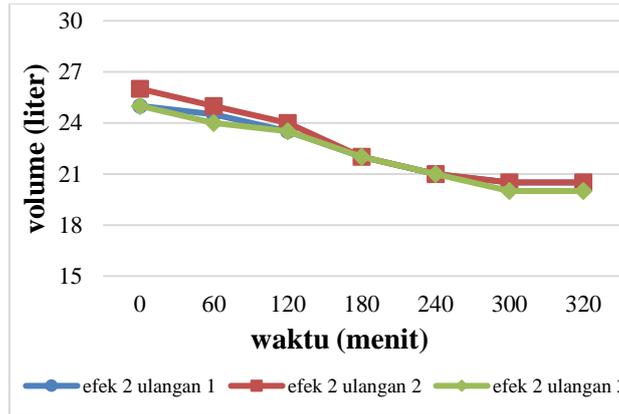
- **Perhitungan Overall Heat Transfer Coefficient (U)**

Variabel pendukung seperti koefien konveksi dalam *tube* ( $h_i$ ) dan luar *tube* ( $h_o$ ) telah ditentukan, maka dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan *Overall Heat Transfer Coefficient* (U). Penentuan nilai U didasarkan pada persamaan 9. Pada perhitungan diketahui bahwa *fouling factor* ( $R''_{f,o}$ ) untuk *organic solvent*= 0,009. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* rata-rata dari semua ulangan adalah sebesar 35,983 w/m<sup>2</sup>.K. Nilai tersebut selanjutnya disubstitusikan pada persamaan pindah panas konveksi keseluruhan ( $q_{konveksi}$ ). Hasil menunjukkan nilai  $q$  sebesar 135,6 watt.

Nilai pindah panas konveksi dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya dimensi dari *tube* termasuk besar diameter dan panjang serta banyaknya jumlah lubang. Faktor lain yang juga dapat mempengaruhi besarnya *heat transfer* adalah kecepatan fluida yang mengalir dalam sistem *heat exchanger*. Semakin cepat udara yang mengalir akan mempengaruhi kecepatan rambat panas dalam material. Selain itu akan mempengaruhi kelembapan udara yang ada dalam ruang proses. Ketika kecepatan udara meningkat dalam kondisi udara jenuh, kelembapan akan menurun dan dapat meningkatkan laju pengeringan, meskipun dalam porsi yang rendah (Burmester & Eggers, 2010).

**d. Pengaruh Pindah Panas terhadap proses penguapan**

Nilai pindah panas yang dihasilkan dalam seluruh luasan *heat exchanger* adalah sebesar 4656,6 watt. Besarnya pindah panas yang dihasilkan dari *heat exchanger* akan digunakan dalam melakukan proses evaporasi di tabung efek 2 ditambah dengan aktifitas pompa vakum. Berikut grafik dari laju pengurangan volume nira yang terjadi pada efek 2 ditunjukkan pada **gambar 8**.



**Gambar 8.** Grafik laju pengurangan Volume efek 2

Berdasarkan grafik diatas menunjukkan terjadi pengurangan volume nira selama proses evaporasi berlangsung. Volume awal pada proses evaporasi di efek 2 rata-rata sebesar 26,5 liter dan setelah selesai proses volume akhir rata-rata sebesar 21,2 liter. Sehingga dapat diketahui laju penurunan rata-rata nira yang diproses dalam efek 2 sebesar 1,03 liter/jam pada tekanan -59,5 CmHg. Hasil tersebut sejalan dengan peneliti sebelumnya yang memaparkan hasil penelitian bahwa terdapat hubungan linieritas berupa tingginya pindah panas mempengaruhi besaran dan kecepatan laju penguapan (Syakdani et al., 2019).

Pada dasarnya dari hasil tersebut, peneliti ingin mengetahui kinerja kondisi operasi desain dari hasil analisis pindah panas terhadap laju penguapan. Dari hasil yang dipaparkan, dengan nilai pindah panas sebesar 4656,6 watt dapat menguapkan air dari proses evaporasi nira tebu sebesar 1,03 liter/jam pada kondisi vakum. Melalui analisis pindah panas dapat digunakan untuk mengetahui seberapa efektif mesin tersebut dapat bekerja dan menjadi dasar dalam proses perancangan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dari pindah panas yang terjadi pada *heat exchanger* evaporator efek ganda didapatkan nilai pindah panas konduksi sebesar 4521 watt, dan nilai pindah panas konveksi 135,6 watt pada tekanan rata-rata -59,5 CmHg. Pada kondisi vakum nilai pindah panas tersebut dapat menyebabkan laju evaporasi nira tebu pada efek 2 sebesar 1,03 liter/jam.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada KEMENRISTEK DIKTI dan Universitas Brawijaya yang telah memberikan dukungan dana dan sarana sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.

### PENDANAAN

Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

### CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dengan pihak mana pun. Pendanaan dilakukan secara mandiri sehingga dalam desain penelitian, dalam pengumpulan, analisis, atau interpretasi data, dalam penulisan naskah, atau dalam keputusan untuk mengumumkan hasil penelitian dilakukan secara bersama antara penulis dengan tim peneliti.

## DAFTAR REFERENSI

- A. Sorour, M. (2015). Optimization of Multiple Effect Evaporators Designed for Fruit Juice Concentrate. *American Journal of Energy Engineering*, 3(2), 6. <https://doi.org/10.11648/j.ajee.s.2015030201.12>
- Ali, E., Orfi, J., AlAnsary, H., Soukane, S., Elcik, H., Alpatova, A., & Ghaffour, N. (2021). Cost analysis of multiple effect evaporation and membrane distillation hybrid desalination system. *Desalination*, 517 (June), 115258. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115258>
- Bonan, G. (2019). Fundamentals of Energy and Mass Transfer. In *Climate Change and Terrestrial Ecosystem Modeling*. <https://doi.org/10.1017/9781107339217.004>
- Burmester, K., & Eggers, R. (2010). Heat and mass transfer during the coffee drying process. *Journal of Food Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.021>
- Darmanto, P. S., Dwi, D., & Ismail, M. (2005). Kaji Numerik Dan Eksperimental Perpindahan Panas Pada Evaporator Untuk Mendinginkan Udara. *Mesin*, 20(1), 24-31.
- Frank P. Incropera's, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, A. S. L. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 8th Edition* (8th ed.). John Wiley and Son. <https://www.wiley.com/engb/Incropera%27s+Principles+of+Heat+and+Mass+Transfer%2C+8th+Edition%2C+Global+Edition-p-9781119409090>
- Holdsworth, S. D., & Simpson, R. (2016). Heat Transfer. In *Food Engineering Series*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24904-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24904-9_2)
- Michaleris, P. (2014). Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes. *Finite Elements in Analysis and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.04.003>
- Riadi, I., Putra, Z. A., & Cahyono, H. (2021). Thermal integration analysis and improved configuration for multiple effect evaporator system based on pinch analysis. *Reaktor*, 21(2), 74-93. <https://doi.org/10.14710/reaktor.21.2.74-93>
- Saputra, M., & Ferdian, A. (2020). Analisis Perpindahan Panas Pada Heat Exchanger Di Furnace Boiler Circulating Fluidizing Bed Unit 1 Pltu Nagan Raya 2 X 110 Mw. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 4(1), 1-13. <https://doi.org/10.35308/jmkn.v4i1.1576>
- Sasmita, S., Jamaluddin P, J. P., & Syam, H. (2018). Laju Pindah Panas Secara Konduksi Dan Penguapan Air Selama Proses Pengeringan Gabah Menggunakan Cabinet Dryer. *Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian*, 1(1), 77. <https://doi.org/10.26858/jptp.v1i1.6221>
- Storia, E. A. (2016). Pengaruh °Brix Terhadap Karakteristik Effect on Heat Transfer Characteristic of Robert Evaporator Quintuple-Effect System in Gempolkrep Sugar Factory. Underthesis. Surabaya : ITS
- Syakdani, A., Purnamasari, I., & Necessary, E. (2019). Prototype Of Vacuum Evaporator (The

Effectiveness of Temperature and Evaporating Time on The Evaporation Rate and Vacuum Pressure in Mengkudu (*Morinda Citrifolia* L.) Fruits Syrup. *Jurnal Kinetika*, 10(2), 29-35. <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>

Tyas, M. W., Sutan, A. T., & Ruslan, H. (2017). Analisis Nomografi Suhu , Laju Penguapan Dan Tekanan Udara Pada Alat Desalinasi Tenaga Surya Dengan Pengaturan Vakum The Nomographic Analysis Against Temperature , Evaporation Rate and Air Pressure For A Solar Powered Desalination Device with Vacuum Contr. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 02, 55-61. <https://jsal.ub.ac.id/index.php/jsal/article/view/271>

Wijaya, R., Hariono, B., & Fk, W. (2019). Analysis of Heat Transfer Evaporation Process for Making Ants Sugar Made From Fresh Raw Neera. *Proceedings of The Second International on Food and Agriculture*, 2, 426-435.