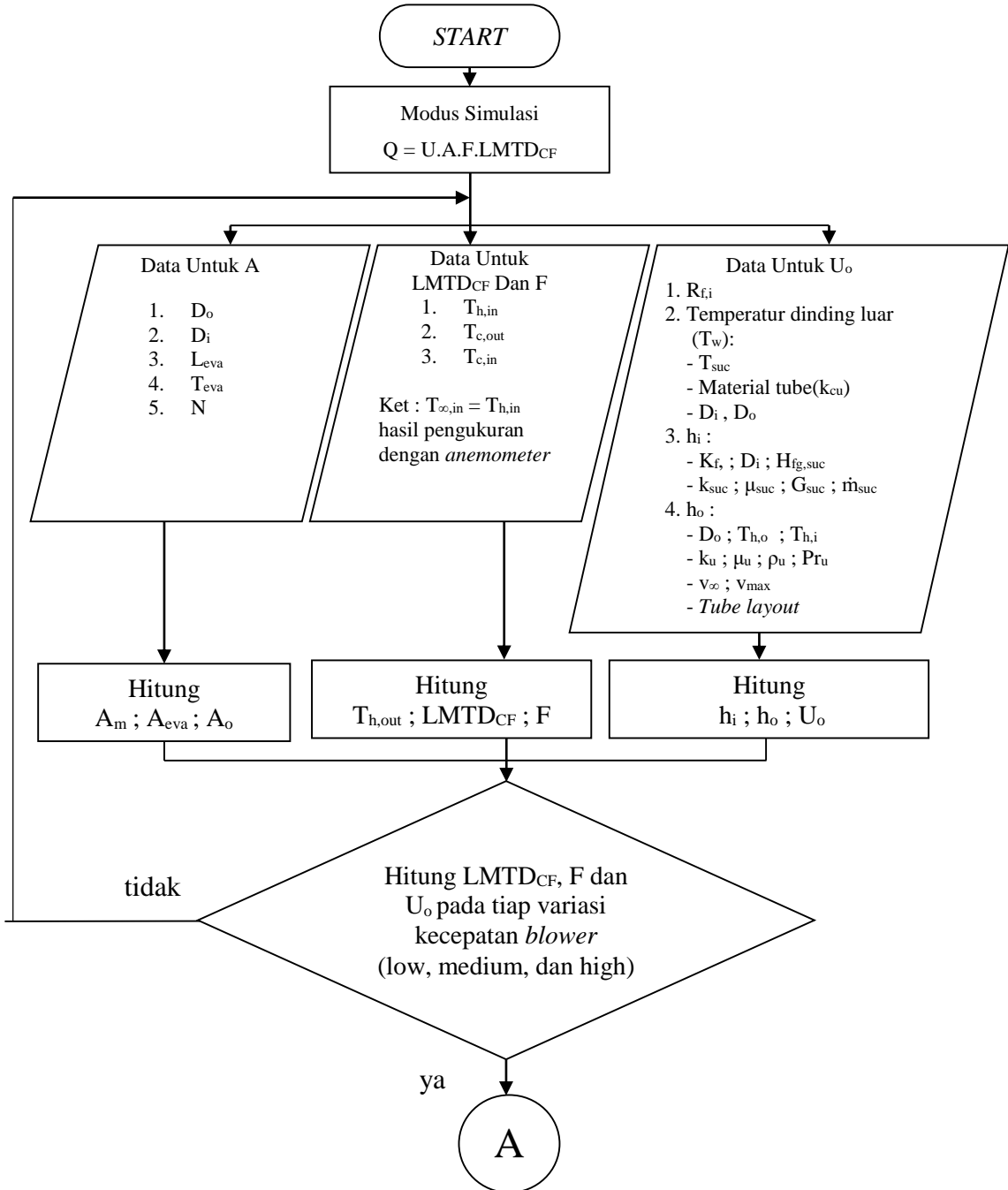


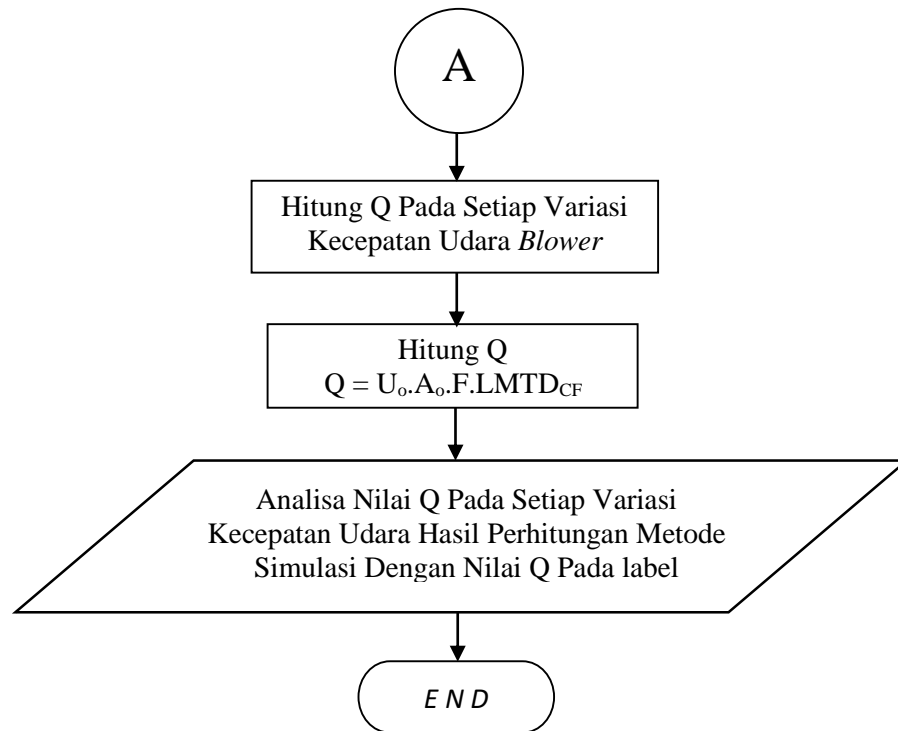
## BAB IV PERHITUNGAN CATU KALOR

### 4.1. Diagram Alir Perhitungan

Diagram alir perhitungan dapat dilihat pada gambar (4.1) berikut:



**Gambar 4.1** Diagram alir perhitungan



**Gambar 4.2** Diagram alir perhitungan lanjutan

#### 4.2. Pengambilan Data

- |  |             |
|--|-------------|
| a. Karakteristik termal tembaga        | = Tabel 3.1 |
| b. Catu kalor label spesifikasi pabrik | = Tabel 3.2 |
| c. Tekanan refrigeran R-22             | = Tabel 3.3 |
| d. Data geometri                       | = Tabel 3.6 |
| e. Variasi kecepatan udara             | = Tabel 3.8 |

### 4.3. Perhitungan Manual

#### 4.3.1. Perhitungan Luas Perpindahan Kalor Dan Luas Aliran Udara

##### 4.3.1.1. Perhitungan Luas Permukaan Perpindahan Kalor

$$A_o = N \cdot \pi \cdot D_o \cdot L_{eva} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$A_o = 30 \cdot \pi \cdot 0,005m \cdot 0,677m$$

$$A_o = 0,32 \text{ m}^2$$

Keterangan :

N = Jumlah *tube* pada evaporator

D<sub>o</sub> = Diameter luar pipa (m)

L<sub>eva</sub> = panjang pipa evaporator pertingkat (m)

##### 4.3.1.3. Perhitungan Luas Udara Masuk Permukaan Evaporator

$$A_{eva} = L_{eva} \cdot t_{eva} \dots \dots \dots (2.18)$$

$$A_{eva} = 0,677m \cdot 0,295m$$

$$A_{eva} = 0,199 \text{ m}^2$$

Keterangan :

L<sub>eva</sub> = Panjang pipa evaporator pertingkat (m)

t<sub>eva</sub> = Tinggi evaporator (m)

### 4.3.2. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Dalam Pipa

Perhitungan untuk menentukan nilai koefisien perpindahan kalor sisi dalam pipa ( $h_i$ ) diurutkan sebagai berikut :

#### 4.3.2.1. Mencari Temperatur *Suction* Dan *Discharge*

Dengan tekanan *suction* R-22 70 Psi (482,633 kPa) dan *discharge* R-22 225 Psi (1551,32 kPa), maka temperatur *suction* ( $T_{suc}$ ) dan *discharge* ( $T_{disc}$ ) dapat dihitung dengan interpolasi pada tabel propertis sifat fisik R-22 pada lampiran 1 yang menghasilkan data sebagai berikut:

**Tabel 4.1** Temperatur *suction* dan *discharge*

Sisi	Tekanan (kPa)	Temperatur (K)
<i>Suction</i>	448,158414	272,04
<i>Discharge</i>	1551,32	313,47

#### 4.3.2.1. Mencari Nilai Entalpi Pada Temperatur *Suction* dan *Discharge*

Dengan temperatur *suction* R-22 272,04 K (-0,96 °C) dan *discharge* R-22 313,47 (40,47 °C), maka nilai entalpi ( $h$ ) pada sisi *suction* dan *discharge* dapat dihitung dengan interpolasi pada tabel propertis sifat fisik R-22 pada lampiran 1 yang menghasilkan data sebagai berikut:

**Tabel 4.2** Nilai entalpi termal R-22 pada temperatur *suction* dan *discharge*

Sisi	Temperatur (K)	Enthalpy (kJ/kg)		
		<i>Liquid</i> ( $h_f$ )	<i>Latent</i> ( $h_{fg}$ )	<i>Vapour</i> ( $h_g$ )
<i>Suction</i>	272,04	198,848	205,864	404,712
<i>Discharge</i>	313,47	250,258	166,036	416,294

#### 4.3.2.2. Mencari Parameter Kondisi Cair Jenuh R-22 Dalam Pipa

Dengan temperatur *suction* R-22 ( $T_{suc}$ ) dalam pipa evaporator 272,04 K (-0,96 °C), maka parameter termal cair jenuh refrigeran R-22 dapat dihitung dengan interpolasi pada tabel A.5 Incropera pada lampiran 2 yang menghasilkan data sebagai berikut:

**Tabel 4.3** Parameter termal R-22 pada temperatur *suction*

Parameter termal R-22 kondisi cair jenuh pada temperatur <i>suction</i> ( $T_{suc} = 272,04$ K)	Nilai
$\rho_{suc}$ ( <i>density</i> R-22) $\text{kg/m}^3$	1285,123
$k_{suc}$ (konduktivitas R-22) $\text{W/m.K}$	$95,282 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{suc}$ ( <i>viscosity</i> R-22) $\text{kg/m.s}$	$0,02188 \cdot 10^{-2}$
$Pr_{suc}$ (angka Prandtl R-22)	2,679

#### 4.3.2.3. Perhitungan Massa Spesifik R-22 Aliran *Suction*

$$\dot{m}_{suc} = \frac{Q_{eva,sp}}{h_{g,suc} - h_{fg,suc}} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\dot{m}_{suc} = \frac{2,051497 \text{ kJ/s}}{(404,712 - 205,864) \text{ kJ/kg}}$$

$$\dot{m}_{suc} = 0,01 \text{ kg/s}$$

Keterangan :

$Q_{eva,np}$  = Kapasitas pendingin evaporator label spesifikasi pabrik (kW)

$h_{g,suc}$  = Entalpi fasa gas pada bagian *suction* (kJ/kg)

$h_{fg,suc}$  = Entalpi fasa campuran pada bagian *suction* (kJ/kg)

#### 4.3.2.4. Perhitungan Fluks Massa Aliran *Suction*

$$G_{suc} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{suc}}{\pi \cdot D_i^2} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$G_{suc} = \frac{4 \cdot 0.01 \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,0042 \text{ m})^2}$$

$$G_{suc} = 721,791 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Keterangan :

$D_i$  = Diameter dalam pipa (m)

$\dot{m}_{suc}$  = Massa spesifik aliran *suction* (kg/s)

#### 4.3.2.5. Perhitungan Angka Reynolds R-22 Aliran *Suction*

$$Re_{suc} = \frac{G_{suc} \cdot D_i}{\mu_{suc}} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$Re_{suc} = \frac{721,791 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot 0,0042 \text{ m}}{0,02188 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}$$

$$Re_{suc} = 13855,22 \text{ (} Re_{suc} > 4000 = \text{Turbulen)}$$

Keterangan :

$G_{suc}$  = Flux massa R-22 aliran *suction* (kg/m<sup>2</sup>·s)

$D_i$  = Diameter dalam pipa (m)

$\mu_{suc}$  = Viskositas termal R-22 temperatur *suction* (kg/m·s)

#### 4.3.2.6. Perhitungan *Pierre Boilling Number* Aliran *Suction*

$$K_f = \frac{h_{out} - h_{in}}{L_{eva} \cdot N \cdot g} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dengan  $h_{out}$  merupakan fasa entalpi keluar evaporator dan  $h_{in}$  adalah fasa entalpi masuk evaporator, maka:

$$K_f = \frac{h_{g,suc} - h_{fg,suc}}{L_{eva} \cdot N \cdot g}$$

$$K_f = \frac{(404720 - 205864) \text{ J/kg}}{0,677 \text{ m} \cdot 30 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$K_f = 998,067$$

Keterangan :

N = Jumlah *tube* pada evaporator

$L_{eva}$  = Panjang pipa evaporator pertingkat (m)

g = Percepatan gravitasi bumi ( $\text{m/s}^2$ )

$h_{g,suc}$  = Entalpi fasa gas pada bagian *suction* (kJ/kg)

$h_{fg,suc}$  = Entalpi fasa campuran pada bagian *suction* (kJ/kg)

#### 4.3.2.7. Perhitungan Angka Nusselt refrigeran 2 fasa pada tekanan *suction*

Evaporator AC split memiliki keluaran berupa gas keseluruhan (evaporasi sempurna), maka perhitungan dapat diselesaikan dengan persamaan 2.11.

$$Nu_{suc} = 1,0 \cdot 10^{-2} \cdot (Re_{suc}^2 \cdot K_f)^{0,4} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$Nu_{suc} = 1,0 \cdot 10^{-2} \cdot (13855,22^2 \cdot 998,067)^{0,4}$$

$$Nu_{suc} = 325,803$$

Keterangan :

$K_f$  = *Pierre Boiling Number*

$Re_{suc}$  = Angka Reynolds refrigeran bagian *suction*

Dimana :  $Re^2 \cdot K_f < 3,5 \cdot 10^{11}$

$Nu_{suc} < 420$

#### 4.3.2.8. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Dalam Pipa

$$h_i = \frac{Nu_{suc} \cdot k_{suc}}{Di} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$h_i = \frac{325,803 \cdot 95,282 \cdot 10^{-3} \frac{W}{m.K}}{0,0042m}$$

$$h_i = 5349,472 \text{ W/m}^2.K$$

Keterangan :

$Nu_{suc}$  = Angka Nusselt dua fasa refrigeran pada tekanan *suction*

$k_{suc}$  = Konduktivitas termal refrigeran pada tekanan *suction* (W/m.K)

$Di$  = Diameter dalam pipa (m)



#### 4.3.2.9. Perhitungan Temperatur Wall

- a. Mencari nilai konduktivitas termal tembaga pada temperatur *suction*

Dengan temperatur *suction* R-22 ( $T_{suc}$ ) dalam evaporator 272,04 K (-0,96 °C), maka konduktivitas termal tembaga ( $k_{cu}$ ) dapat dihitung dengan interpolasi pada tabel karakteristik termal logam padat pada tabel 3.1 yang menghasilkan data sebagai berikut:

**Tabel 4.4** Konduktivitas termal tembaga pada temperatur *suction* R-22

Temperatur R-22 <i>Suction</i> (K)	Konduktivitas Termal Tembaga (W/m.K)
272,04	404,355

- b. Perhitungan temperatur *wall*

$$T_w = T_{suc} + \left( \frac{Q_{eva,sp} \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L_{eva} \cdot N} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

$$T_w = 272,04K + \left( \frac{2051,497W \cdot \ln\left(\frac{0,005m}{0,0042m}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 404,355 \frac{W}{m.K} \cdot 0,677m \cdot 30} \right)$$

$$T_w = 272,047 K$$

$$T_w(^{\circ}C) = 272,047 K - 273 = - 0,953 ^{\circ}C$$

Keterangan :

$T_{suc}$  = Temperatur R-22 tekanan *suction* (K)

$Q_{eva,sp}$  = Kapasitas pendinginan evaporator label spesifikasi pabrik (W)

$k$  = Konduktivitas termal material pipa (W/m.K)

$L_{eva}$  = Panjang pipa evaporator per-tingkat (m)

### 4.3.3. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Luar Pipa

Perhitungan untuk menentukan nilai koefisien perpindahan kalor sisi luar pipa ( $h_o$ ) diurutkan sebagai berikut :

#### 4.3.3.1. Perhitungan Temperatur Udara Pada Susunan *Tube*

$$T_u = \frac{T_w + T_{\infty, in}}{2} \dots\dots\dots(2.16)$$

$$T_u = \frac{272,047 \text{ K} + 302,1 \text{ K}}{2}$$

$$T_u = 287,073 \text{ K}$$

$$T_u(^{\circ}\text{C}) = 287,073 \text{ K} + 273 = 14,073 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Keterangan :

$T_w$  = Temperatur *wall* (K)

$T_{\infty, in}$  = Temperatur udara bebas masuk evaporator (K) gambar 3.7

#### 4.3.3.2. Mencari Parameter Udara Pada Tekanan Atmosfer

Dengan temperatur udara pada tekanan atmosfer ( $T_u$ ) saat memasuki evaporator 287,073 K (14,073  $^{\circ}\text{C}$ ), maka parameter karakteristik udara pada tekanan atmosfer dapat dihitung dengan interpolasi pada tabel A.4 incopera pada lampiran 3 yang menghasilkan data sebagai berikut :

**Tabel 4.5** Parameter termal udara pada temperatur atmosfer ( $T_u = 287,073 \text{ K}$ )

Parameter termal udara pada tekanan atmosfer pada temperatur ( $T_u = 287,073 \text{ K}$ )	Nilai
$\mu_u$ ( <i>viscosity</i> udara) kg/m.s	$178,137 \cdot 10^{-7}$
$k_u$ (konduktivitas udara) W/m.K	$25,266 \cdot 10^{-3}$
$c_{p_u}$ (panas jenis udara) J/kg.K	1007
$Pr_u$ (angka Prandtl udara)	0,710

**4.3.3.3. Perhitungan Densitas Udara**

$$\rho_u = \frac{P_{\text{atm}}}{R \cdot T_u} \dots \dots \dots (2.17)$$

$$\rho_u = \frac{1,0132 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}^2}}{287 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \cdot 287,073 \text{ K}}$$

$$\rho_u = 1,230 \text{ kg/m}^3$$

Keterangan :

$R$  = Konstanta gas pada udara (J/kg.K)

$P_{\text{atm}}$  = Tekanan udara pada 1 atm ( $\text{kg/m.s}^2$ )

$T_u$  = Temperatur udara dalam evaporator (K)

#### 4.3.3.6. Perhitungan Kecepatan Udara Maksimum Pada Susunan *Tube*

Perhitungan untuk menentukan kecepatan udara maksimum susunan *tube* diurutkan sebagai berikut :

- a. Perhitungan diagonal *pitch*

$$S_D = \sqrt{\left(\frac{S_T}{2}\right)^2 + (S_L)^2} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$S_D = \sqrt{\left(\frac{0,02 \text{ m}}{2}\right)^2 + (0,01 \text{ m})^2}$$

$$S_D = 0,014 \text{ m}$$

Keterangan:

$S_T$  = *Tranverse pitch* (m)

$S_L$  = *Longitudinal pitch* (m)

- b. Persamaan yang digunakan

$$\frac{S_T + D_o}{2} = \frac{0,02 \text{ m} + 0,005 \text{ m}}{2} = 0,0125 \text{ m} < S_D \quad (S_D = 0,014 \text{ m})$$

Untuk kasus  $S_D > \frac{S_T + D}{2}$ , maka persamaan yang digunakan:

$$v_{max} = \frac{S_T \cdot v_{\infty}}{S_T - D} \dots\dots\dots(2.21)$$

- c. Perhitungan kecepatan udara maksimum pada susunan *tube*

Input kecepatan udara bebas masuk evaporator memiliki tiga variasi (*low, medium* dan *high*), maka perhitungan dilakukan pada tiap variasi dengan menggunakan persamaan 2.21.

c.1. Perhitungan kecepatan udara maksimum pada susunan *tube* saat variasi *low*

$$v_{max,L} = \frac{S_T \cdot v_{\infty,L}}{S_T - D_o}$$

$$v_{max,L} = \frac{0,02 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m/s}}{0,02 \text{ m} - 0,005 \text{ m}}$$

$$v_{max,L} = 1,6 \text{ m/s}$$

Keterangan :

$v_{\infty,L}$  = Kecepatan udara bebas masuk evaporator pada variasi *low* (m/s)

$D_o$  = Diameter luar pipa evaporator (m)

c.2. Perhitungan kecepatan udara maksimum pada susunan *tube* saat variasi *medium*

$$v_{max,M} = \frac{S_T \cdot v_{\infty,M}}{S_T - D_o}$$

$$v_{max,M} = \frac{0,02 \text{ m} \cdot 1,7 \text{ m/s}}{0,02 \text{ m} - 0,005 \text{ m}}$$

$$v_{max,M} = 2,3 \text{ m/s}$$

Keterangan :

$v_{\infty,M}$  = Kecepatan udara bebas masuk evaporator pada variasi *medium*  
(m/s)

$D_o$  = Diameter luar pipa evaporator (m)

c.3. Perhitungan kecepatan udara maksimum pada susunan *tube* saat variasi *high*

$$v_{max,H} = \frac{S_T \cdot v_{\infty,H}}{S_T - D_o}$$

$$v_{max,H} = \frac{0,02 \text{ m} \cdot 2,4 \text{ m/s}}{0,02 \text{ m} - 0,005 \text{ m}}$$

$$v_{max,H} = 3,2 \text{ m/s}$$

Keterangan :

$v_{\infty,H}$  = Kecepatan udara bebas masuk evaporator pada variasi *high* (m/s)

$D_o$  = Diameter luar pipa evaporator (m)

#### 4.3.3.7. Perhitungan Angka Reynolds Udara

Input kecepatan maksimum udara pada susunan *tube* memiliki tiga variasi (*low, medium* dan *high*), maka perhitungan dilakukan pada tiap variasi dengan menggunakan persamaan 2.23.

a. Perhitungan angka Reynolds udara pada variasi *low*

$$Re_{u,L} = \frac{\rho_u \cdot v_{max,L} \cdot D_o}{\mu_u}$$

$$Re_{u,L} = \frac{1,230 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,6 \frac{m}{s} \cdot 0,005 \text{ m}}{178,137 \cdot 10^{-7} \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re_{u,L} = 552,38$$

Keterangan:

$\mu_u$  = Viskositas termal udara (kg/m.s)

$\rho_u$  = Densitas termal udara (kg/m<sup>3</sup>)

$v_{\max,L}$  = Kecepatan maksimum udara pada susunan *tube* saat variasi  
*low*(m/s)

$D_o$  = Diameter luar pipa evaporator (m)

b. Perhitungan angka Reynolds udara saat variasi *medium*

$$Re_{u,M} = \frac{\rho_u \cdot v_{\max,M} \cdot D_o}{\mu_u}$$

$$Re_{u,M} = \frac{1,230 \frac{kg}{m^3} \cdot 2,3 \frac{m}{s} \cdot 0,005 m}{178,137 \cdot 10^{-7} \frac{kg}{m.s}}$$

$$Re_{u,M} = 794,05$$

Keterangan:

$\mu_u$  = Viskositas termal udara (kg/m.s)

$\rho_u$  = Densitas termal udara (kg/m<sup>3</sup>)

$v_{\max,M}$  = Kecepatan maksimum udara pada susunan *tube* saat variasi  
*medium*(m/s)

$D_o$  = Diameter luar pipa evaporator (m)

c. Perhitungan angka Reynolds udara saat variasi *high*

$$Re_{u,H} = \frac{\rho_u \cdot v_{\max,H} \cdot D_o}{\mu_u}$$

$$Re_{u,H} = \frac{1,230 \frac{kg}{m^3} \cdot 3,2 \frac{m}{s} \cdot 0,005 m}{178,137 \cdot 10^{-7} \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re_{u,H} = 1104,77$$

Keterangan:

$\mu_u$  = Viskositas termal udara (kg/m.s)

$\rho_u$  = Densitas termal udara (kg/m<sup>3</sup>)

$v_{\max,H}$  = Kecepatan maksimum udara pada susunan *tube* saat variasi *high*  
(m/s)

$D_o$  = Diamater luar pipa evaporator (m)

#### 4.3.3.8. Perhitungan Angka Nusselt Udara

Perhitungan untuk menentukan angka Nusselt udara diurutkan sebagai berikut :

a. Mencari persamaan angka Nusselt udara

Angka Nusselt udara dapat dihitung menggunakan persamaan 2.24, dimana nilai C dan n didapatkan menggunakan gambar 2.19.

$$\frac{S_p}{D_o} = \frac{S_L}{D_o} = \frac{\text{Longitudinal Pitch}}{\text{Outer Diameter}} = \frac{0,01}{0,005} = 2$$

$$\frac{S_n}{D_o} = \frac{S_T}{D_o} = \frac{\text{Transverse Pitch}}{\text{Outer Diameter}} = \frac{0,02}{0,005} = 4 \approx 3$$

Maka diperoleh:

$$C = 0,498 \quad n = 0,570$$



Dengan menstutitusikan nilai C dan n, maka persamaan menjadi :

$$Nu_u = 0,498 \cdot Re_u^{0,570} \cdot Pr_u^{1/3} \dots\dots\dots(4.1)$$

b. Perhitungan angka Nusselt udara

Input angka Reynolds udara memiliki tiga variasi (*low, medium* dan *high*), maka perhitungan dilakukan pada tiap variasi dengan menggunakan persamaan 4.1.

b.1. Perhitungan angka Nusselt udara pada variasi *low*

$$Nu_{u,L} = 0,498 \cdot Re_{u,L}^{0,570} \cdot Pr_u^{1/3}$$

$$Nu_{u,L} = 0,498 \cdot 552,38^{0,570} \cdot 0,710^{1/3}$$

$$Nu_{u,L} = 16,25$$

Keterangan :

$Re_{u,L}$  = Angka Reynold udara variasi *low*

$Pr_u$  = Bilangan Prandtl udara

b.2. Perhitungan angka Nusselt udara pada variasi *medium*

$$Nu_{u,M} = 0,498 \cdot Re_{u,M}^{0,570} \cdot Pr_u^{1/3}$$

$$Nu_{u,M} = 0,498 \cdot 794,05^{0,570} \cdot 0,710^{1/3}$$

$$Nu_{u,M} = 19,98$$

Keterangan :

$Re_{u,M}$  = Angka Reynold udara variasi *medium*

$Pr_u$  = Bilangan Prandtl udara

b.3. Perhitungan angka Nusselt udara pada variasi *high*

$$Nu_{u,H} = 0,498 \cdot Re_{u,H}^{0,570} \cdot Pr_u^{1/3}$$

$$Nu_{u,H} = 0,498 \cdot 1104,77^{0,570} \cdot 0,710^{1/3}$$

$$Nu_{u,H} = 24,12$$

Keterangan :

$Re_{u,H}$  = Angka Reynold udara variasi *high*

$Pr_u$  = Bilangan Prandtl udara

#### 4.3.3.9. Perhitungan Koevisien Perpindahan Panas Luar Pipa

Input angka Nusselt udara memiliki tiga variasi (*low, medium* dan *high*), maka perhitungan dilakukan pada tiap variasi dengan menggunakan persamaan 2.25.

a. Perhitungan koevisien perpindahan panas luar pipa variasi *low*

$$h_{o,L} = \frac{Nu_{u,L} \cdot k_u}{D_o}$$

$$h_{o,L} = \frac{16,25 \cdot 25,266 \cdot 10^{-3} \frac{W}{m.K}}{0,005 \text{ m}}$$

$$h_{o,L} = 82,11 \text{ W/m}^2.K$$

Keterangan :

$Nu_{u,L}$  = Angka Nusselt udara variasi *low*

$k_u$  = Konduktivitas termal udara (W/m.K)

$D_o$  = Diameter dalam pipa (m)

b. Perhitungan koefisien perpindahan panas luar pipa variasi *medium*

$$h_{o,M} = \frac{Nu_{u,M} \cdot k_u}{D_o}$$

$$h_{o,M} = \frac{19,98 \cdot 25,266 \cdot 10^{-3} \frac{W}{m.K}}{0,005 \text{ m}}$$

$$h_{o,M} = 100,96 \text{ W/m}^2.K$$

Keterangan :

$Nu_{u,M}$  = Angka Nusselt udara variasi *medium*

$k_u$  = Konduktivitas termal udara (W/m.K)

$D_o$  = Diameter dalam pipa (m)

c. Perhitungan koefisien perpindahan panas luar pipa variasi *high*

$$h_{o,H} = \frac{Nu_{u,H} \cdot k_u}{D_o}$$

$$h_{o,H} = \frac{24,12 \cdot 25,266 \cdot 10^{-3} \frac{W}{m.K}}{0,005 \text{ m}}$$

$$h_{o,H} = 121,88 \text{ W/m}^2.K$$

Keterangan :

$Nu_{u,H}$  = Angka Nusselt udara variasi *high*

$k_u$  = Konduktivitas termal udara (W/m.K)

$D_o$  = Diameter dalam pipa (m)

#### 4.3.3.10. Perhitungan Temperatur Udara Bebas Keluar Evaporator

Perhitungan untuk menentukan temperatur udara maksimum susunan *tube* diurutkan sebagai berikut :

- a. Perhitungan laju aliran massa udara bebas masuk evaporator

Input kecepatan udara bebas masuk evaporator memiliki tiga variasi (*low, medium* dan *high*), maka perhitungan dilakukan pada tiap variasi dengan menggunakan persamaan 2.7.

- a.1. Perhitungan laju aliran massa udara saat variasi *low*

$$\dot{m}_{\infty, in} = \rho_{\infty, in} \cdot A_{eva} \cdot v_{\infty, L}$$

$$\dot{m}_{\infty, in, L} = 1,17 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,199 \text{ m}^2 \cdot 1,2 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_{\infty, in, L} = 0,27 \text{ kg/s}$$

Keterangan :

$\rho_{\infty, in}$  = Densitas udara bebas masuk susunan *tube* ( $\text{kg/m}^3$ )

$A_{eva}$  = Luas udara masuk permukaan evaporator ( $\text{m}^2$ )

$v_{\infty, L}$  = Kecepatan udara bebas masuk evaporator saat variasi *low* ( $\text{m/s}$ )

- a.2. Perhitungan laju aliran massa udara saat variasi *medium*

$$\dot{m}_{\infty, in, M} = \rho_{\infty, in} \cdot A_{eva} \cdot v_{\infty, M}$$

$$\dot{m}_{\infty, in, M} = 1,17 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,199 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_{\infty, in, M} = 0,396 \text{ kg/s}$$

Keterangan :

$\rho_{\infty,in}$  = Densitas udara bebas masuk susunan *tube* (kg/m<sup>3</sup>)

$A_{eva}$  = Luas udara masuk permukaan evaporator (m<sup>2</sup>)

$v_{\infty,L}$  = Kecepatan udara bebas masuk evaporator saat variasi *medium* (m/s)

a.3. Perhitungan laju aliran massa udara saat variasi *high*

$$\dot{m}_{\infty,in,H} = \rho_{\infty,in} \cdot A_{eva} \cdot v_{\infty,H}$$

$$\dot{m}_{\infty,in,H} = 1,17 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,199 \text{ m}^2 \cdot 2,4 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_{\infty,in,H} = 0,56 \text{ kg/s}$$

Keterangan :

$\rho_{\infty,in}$  = Densitas udara bebas masuk susunan *tube* (kg/m<sup>3</sup>)

$A_{eva}$  = Luas udara masuk permukaan evaporator (m<sup>2</sup>)

$v_{\infty,L}$  = Kecepatan udara bebas masuk evaporator saat variasi *high* (m/s)

b. Perhitungan temperatur udara bebas keluar evaporator

Input kecepatan udara bebas masuk evaporator memiliki tiga variasi (*low, medium* dan *high*), maka perhitungan dilakukan pada tiap variasi dengan menggunakan rumus laju perpindahan kalor pada persamaan 2.6

b.1. Perhitungan temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *low*

$$T_{\infty, \text{out}, L} = T_{\infty, \text{in}} - \frac{Q_{\text{eva}, \text{sp}}}{\dot{m}_{\infty, \text{in}, L} \cdot c_{p_{\infty, \text{in}}}}$$

$$T_{\infty, \text{out}, L} = 302,1 \text{ K} - \frac{2051,497 \text{ W}}{0,27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1007,1 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}}$$

$$T_{\infty, \text{out}, L} = 294,6 \text{ K}, T_{\infty, \text{out}, L} (^{\circ}\text{C}) = 21,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

## Keterangan :

$\dot{m}_{\infty, \text{in}, L}$  = laju aliran massa udara masuk susunan *tube* saat variasi *low* (kg/s)

$c_{p_{\infty, \text{in}}}$  = Panas jenis udara bebas masuk susunan *tube* (kJ/kg.K)

$T_{\infty, \text{in}} = T_{h, \text{in}}$  = temperaur udara bebas masuk evaporator (K)

$Q_{\text{eva}, \text{sp}}$  = Catu kalor evaporator pada label spesifikasi pabrik (W)

b.2. Perhitungan temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *medium*

$$T_{\infty, \text{out}, M} = T_{\infty, \text{in}} - \frac{Q_{\text{eva}, \text{sp}}}{\dot{m}_{\infty, \text{in}, M} \cdot c_{p_{\infty, \text{in}}}}$$

$$T_{\infty, \text{out}, M} = 302,1 \text{ K} - \frac{2051,497 \text{ W}}{0,396 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1007,1 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}}$$

$$T_{\infty, \text{out}, M} = 296,96 \text{ K}, T_{\infty, \text{out}, L} (^{\circ}\text{C}) = 23,96 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Keterangan :

$\dot{m}_{\infty, \text{in}, M}$  = laju aliran massa masuk udara susunan *tube* saat variasi *medium*  
(kg/s)

$c_{p_{\infty, \text{in}}}$  = Panas jenis udara bebas masuk susunan *tube* (kJ/kg.K)

$T_{\infty, \text{in}} = T_{h, \text{in}}$  = temperaur udara bebas masuk evaporator (K)

$Q_{\text{eva}, \text{sp}}$  = Catu kalor evaporator pada label spesifikasi pabrik (W)

b.3. Perhitungan temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *high*

$$T_{\infty, \text{out}, H} = T_{\infty, \text{in}} - \frac{Q_{\text{eva}, \text{sp}}}{\dot{m}_{\infty, \text{in}, H} \cdot c_{p_{\infty, \text{in}}}}$$

$$T_{\infty, \text{out}, H} = 302,1 \text{ K} - \frac{2051,497 \text{ W}}{0,56 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1007,1 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}}$$

$$T_{\infty, \text{out}, H} = 298,5 \text{ K}, T_{\infty, \text{out}, L} (^{\circ}\text{C}) = 25,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Keterangan :

$\dot{m}_{\infty, \text{in}, H}$  = laju aliran massa masuk udara susunan *tube* saat variasi *high* (kg/s)

$c_{p_{\infty, \text{in}}}$  = Panas jenis udara bebas masuk susunan *tube* (kJ/kg.K)

$T_{\infty, \text{in}} = T_{h, \text{in}}$  = temperaur udara bebas masuk evaporator (K)

$Q_{\text{eva}, \text{sp}}$  = Catu kalor evaporator pada label spesifikasi pabrik (W)

#### 4.3.4. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan

Input koevisien perpindahan panas luar pipa memiliki tiga variasi (*low, medium* dan *high*), maka perhitungan dilakukan pada tiap variasi dengan menggunakan persamaan 2.28.

#### 4.3.4.1. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan Pada Variasi

*Low*

$$U_{o,L} = \frac{1}{\frac{1}{h_{o,L}} + \left( \frac{r_o}{k_{cu}} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \right) + \left( \frac{r_o}{r_i} \cdot \frac{1}{h_i} \right)}$$

$$U_{o,L} = \frac{1}{\frac{1}{82,11 \frac{J}{m^2 \cdot K}} + \left( \frac{0,0025 \text{ m}}{404,355 \frac{W}{m \cdot K}} \cdot \ln\left(\frac{0,0025 \text{ m}}{0,0021 \text{ m}}\right) \right) + \left( \frac{0,0025 \text{ m}}{0,0021 \text{ m}} \cdot \frac{1}{5349,472 \frac{J}{m^2 \cdot K}} \right)}$$

$$U_{o,L} = 80,65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Keterangan:

$r_o$  = Jari-jari luar evaporator (m)

$r_i$  = Jari-jari dalam evaporator (m)

$h_{o,L}$  = Koevisien perpindahan panas diluar pipa variasi *low* pada evaporator ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$h_i$  = Koevisien perpindahan panas didalam pipa evaporator ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$k$  = Konduktivitas termal material pipa ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )

#### 4.3.4.2. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan Pada Variasi

*Medium*

$$U_{o,M} = \frac{1}{\frac{1}{h_{o,M}} + \left( \frac{r_o}{k} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \right) + \left( \frac{r_o}{r_i} \cdot \frac{1}{h_i} \right)}$$

$$U_{o,M} = \frac{1}{\frac{1}{38,091 \frac{J}{m^2 \cdot K}} + \left( \frac{0,0025 \text{ m}}{404,355 \frac{W}{m \cdot K}} \cdot \ln\left(\frac{0,0025 \text{ m}}{0,0021 \text{ m}}\right) \right) + \left( \frac{0,0025 \text{ m}}{0,0021 \text{ m}} \cdot \frac{1}{5349,472 \frac{J}{m^2 \cdot K}} \right)}$$

$$U_{o,M} = 98,72 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$



Keterangan:

- $r_o$  = Jari-jari luar evaporator (m)  
 $r_i$  = Jari-jari dalam evaporator (m)  
 $h_{o,M}$  = Koevisien perpindahan panas diluar pipa variasi *medium* pada evaporator ( $W/m^2.K$ )  
 $h_i$  = Koevisien perpindahan panas didalam pipa evaporator ( $W/m^2.K$ )  
 $k$  = Konduktivitas termal material pipa ( $W/m.K$ )

#### 4.3.4.3. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan Pada Variasi

**High**

$$U_{o,H} = \frac{1}{\frac{1}{h_{o,H}} + \left( \frac{r_o}{k} \cdot \ln \left( \frac{r_o}{r_i} \right) \right) + \left( \frac{r_o}{r_i} \cdot \frac{1}{h_i} \right)}$$

$$U_{o,H} = \frac{1}{\frac{1}{43,068 \frac{J}{m^2.K}} + \left( \frac{0,0025 \text{ m}}{404,355 \frac{W}{m.K}} \cdot \ln \left( \frac{0,0025 \text{ m}}{0,0021 \text{ m}} \right) \right) + \left( \frac{0,0025 \text{ m}}{0,0021 \text{ m}} \cdot \frac{1}{5349,472 \frac{J}{m^2.K}} \right)}$$

$$U_{o,H} = 118,63 \text{ W/m}^2.K$$

Keterangan:

- $r_o$  = Jari-jari luar evaporator (m)  
 $r_i$  = Jari-jari dalam evaporator (m)  
 $h_{o,H}$  = Koevisien perpindahan panas diluar pipa variasi *high* pada evaporator ( $W/m^2.K$ )  
 $h_i$  = Koevisien perpindahan panas didalam pipa evaporator ( $W/m^2.K$ )  
 $k$  = Konduktivitas termal material pipa ( $W/m.K$ )

#### 4.3.5. Perhitungan *Log Mean Temperature Difference Counter Flow*

Pada evaporator memiliki temperatur penyerapan panas konstan, maka beda temperatur rata-rata logaritmik dapat diselesaikan menggunakan persamaan 2.32 pada tiap variasi nilai temperatur udara bebas keluar evaporator (*low*, *medium* dan *high*).

##### 4.3.5.1. Perhitungan *Log Mean Temperature Difference Counter Flow* Pada Variasi *Low*

$$\text{LMTD}_{\text{CF,L}} = \frac{T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{out,L}}}{\ln\left(\frac{T_{h,\text{in}} - T_s}{T_{h,\text{out,L}} - T_s}\right)}$$

$$\text{LMTD}_{\text{CF,L}} = \frac{302,1 \text{ K} - 294,6 \text{ K}}{\ln\left(\frac{302,1 \text{ K} - 272,04 \text{ K}}{294,6 \text{ K} - 272,04 \text{ K}}\right)}$$

$$\text{LMTD}_{\text{CF,L}} (\text{K}) = 26,13 \text{ K}$$

Keterangan :

$T_{h,\text{in}}$  = Temperatur udara bebas masuk evaporator (K)

$T_{h,\text{out,L}}$  = Temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *low* (K)

$T_s$  =  $T_{\text{suc}}$  = Temperatur sisi *suction* R-22 (*cold*) (K)

##### 4.3.5.2. Perhitungan *Log Mean Temperature Difference Counter Flow* Pada Variasi *Medium*

$$\text{LMTD}_{\text{CF,M}} = \frac{T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{out,M}}}{\ln\left(\frac{T_{h,\text{in}} - T_s}{T_{h,\text{out,M}} - T_s}\right)}$$

$$\text{LMTD}_{\text{CF,M}} = \frac{302,1 \text{ K} - 296,96 \text{ K}}{\ln\left(\frac{302,1 \text{ K} - 272,04 \text{ K}}{296,96 \text{ K} - 272,04 \text{ K}}\right)}$$

$$\text{LMTD}_{\text{CF,M}} (\text{K}) = 27,41 \text{ K}$$

Keterangan :

$T_{h,in}$  = Temperatur udara bebas masuk evaporator (K)

$T_{h,out,M}$  = Temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *medium* (K)

$T_s$  =  $T_{suc}$  = Temperatur sisi *suction* R-22 (*cold*) (K)

#### 4.3.5.3. Perhitungan *Log Mean Temperature Difference Counter Flow* Pada Variasi *High*

$$LMTD_{CF,H} = \frac{T_{h,in} - T_{h,out,H}}{\ln\left(\frac{T_{h,in} - T_s}{T_{h,out,H} - T_s}\right)}$$

$$LMTD_{CF,H} = \frac{302,1 \text{ K} - 298,5 \text{ K}}{\ln\left(\frac{302,1 \text{ K} - 272,04 \text{ K}}{298,5 \text{ K} - 272,04 \text{ K}}\right)}$$

$$LMTD_{CF,H} \text{ (K)} = 28,22 \text{ K}$$

Keterangan :

$T_{h,in}$  = Temperatur udara bebas masuk evaporator (K)

$T_{h,out,H}$  = Temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *high* (K)

$T_s$  =  $T_{suc}$  = Temperatur sisi *suction* R-22 (*cold*) (K)

#### 4.3.6. Perhitungan Faktor Koreksi LMTD

Pada evaporator memiliki jenis aliran fasa tunggal aliran menyilang dengan kedua aliran tak campur. Dengan asumsi tersebut maka penyelesaian diselesaikan dengan gambar 2.24 pada tiap variasi temperatur udara bebas keluar evaporator (*low, medium* dan *high*).

#### 4.3.6.1. Perhitungan Faktor Koreksi LMTD Variasi *Low*

$$P = \frac{T_{\infty, \text{out}, L} - T_{\infty, \text{in}}}{T_{\text{suc}} - T_{\infty, \text{in}}}$$

$$R = \frac{T_{\text{suc}} - T_{\text{suc}}}{T_{\infty, \text{out}, L} - T_{\infty, \text{in}}}$$

$$P = \frac{21,6^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}{-0,96^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}$$

$$R = \frac{-0,96^{\circ}\text{C} - (-0,96^{\circ}\text{C})}{21,6^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}$$

$$P = 0,25$$

$$R = 0$$

(Lihat gambar 2.23 tentang *Single-pass cross-flow with both fluids unmixed*). Untuk harga  $R = 0$  dan  $P = 0,25$  didapatkan harga  $F_L = 1$ .

Keterangan :

$T_{h, \text{in}}$  = temperatur udara bebas masuk evaporator ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{h, \text{out}, L}$  = temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *low* ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{suc}}$  = Temperatur sisi *suction* R-22 (*cold*) ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.3.6.2. Perhitungan Faktor Koreksi LMTD Variasi *Medium*

$$P = \frac{T_{\infty, \text{out}, M} - T_{\infty, \text{in}}}{T_{\text{suc}} - T_{\infty, \text{in}}}$$

$$R = \frac{T_{\text{suc}} - T_{\text{suc}}}{T_{\infty, \text{out}, M} - T_{\infty, \text{in}}}$$

$$P = \frac{23,96^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}{-0,96^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}$$

$$R = \frac{-0,96^{\circ}\text{C} - (-0,96^{\circ}\text{C})}{23,96^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}$$

$$P = 0,17$$

$$R = 0$$

(Lihat gambar 2.23 tentang *Single-pass cross-flow with both fluids unmixed*). Untuk harga  $R = 0$  dan  $P = 0,17$  didapatkan harga  $F_M = 1$ .

Keterangan :

$T_{h,in}$  = temperatur udara bebas masuk evaporator ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{h,out,M}$  = temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *medium* ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{suc}$  = Temperatur sisi *suction* R-22 (*cold*) ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.3.6.1. Perhitungan Faktor Koreksi LMTD Variasi *High*

$$P = \frac{T_{\infty,out,H} - T_{\infty,in}}{T_{suc} - T_{\infty,in}}$$

$$R = \frac{T_{suc} - T_{suc}}{T_{\infty,out,H} - T_{\infty,in}}$$

$$P = \frac{25,5^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}{-0,96^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}$$

$$R = \frac{-0,96^{\circ}\text{C} - (-0,96^{\circ}\text{C})}{25,5^{\circ}\text{C} - 29,1^{\circ}\text{C}}$$

$$P = 0,12$$

$$R = 0$$

(Lihat gambar 2.23 tentang *Single-pass cross-flow with both fluids unmixed*). Untuk harga  $R = 0$  dan  $P = 0,12$  didapatkan harga  $F_H = 1$ .

Keterangan :

$T_{h,in}$  = temperatur udara bebas masuk evaporator ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{h,out,H}$  = temperatur udara bebas keluar evaporator saat variasi *high* ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{suc}$  = Temperatur sisi *suction* R-22 (*cold*) ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 4.3.7. Perhitungan Nilai Catu Kalor Evaporator

Catu kalor evaporator dihitung berdasarkan variasi kecepatan (*low*, *medium* dan *high*) udara bebas *blower* dengan menggunakan persamaan 2.4.

#### 4.3.7.1. Perhitungan Nilai Catu Kalor Evaporator Variasi *Low*

$$Q_{\text{eva,L}} = U_{\text{o,L}} \cdot A_{\text{o}} \cdot F_{\text{L}} \cdot \text{LMTD}_{\text{CF,L}}$$

$$Q_{\text{eva,L}} = 80,65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,32 \text{ m}^2 \cdot 1 \cdot 26,13 \text{ K}$$

$$Q_{\text{eva,L}} = 674,36 \text{ W} = 2301,01 \text{ Btu/hr}$$

Keterangan :

$U_{\text{o,L}}$  = Koefisien perpindahan kalor keseluruhan luar pipa pada variasi *low* ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$A_{\text{o}}$  = Luasan bidang perpindahan kalor luar pipa ( $\text{m}^2$ )

$F_{\text{L}}$  = Faktor koreksi LMTD pada variasi *low*

$\text{LMTD}_{\text{L}}$  = Beda temperatur rata-rata logaritmik pada variasi *low* ( $\text{K}$ )

#### 4.3.7.2. Perhitungan Nilai Catu Kalor Evaporator Variasi *Medium*

$$Q_{\text{eva,M}} = U_{\text{o,M}} \cdot A_{\text{o}} \cdot F_{\text{M}} \cdot \text{LMTD}_{\text{CF,M}}$$

$$Q_{\text{eva,M}} = 98,72 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,32 \text{ m}^2 \cdot 1 \cdot 27,41 \text{ K}$$

$$Q_{\text{eva,M}} = 865,89 \text{ W} = 2954,54 \text{ Btu/hr}$$

Keterangan :

$U_{o,M}$	= Koefisien perpindahan kalor keseluruhan luar pipa pada variasi <i>medium</i> (W/m <sup>2</sup> .K)
$A_o$	= Luasan bidang perpindahan kalor luar pipa (m <sup>2</sup> )
$F_M$	= Faktor koreksi LMTD pada variasi <i>medium</i>
$LMTD_M$	= Beda temperatur rata-rata logaritmik pada variasi <i>medium</i> (K)

#### 4.3.7.1. Perhitungan Nilai Catu Kalor Evaporator Variasi *High*

$$Q_{eva,H} = U_{o,H} \cdot A_o \cdot F_H \cdot LMTD_{CF,H}$$

$$Q_{eva,H} = 118,63 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,32 \text{ m}^2 \cdot 1 \cdot 28,22 \text{ K}$$

$$Q_{eva,H} = 1071,28 \text{ W} = 3655,36 \text{ Btu/hr}$$

Keterangan :

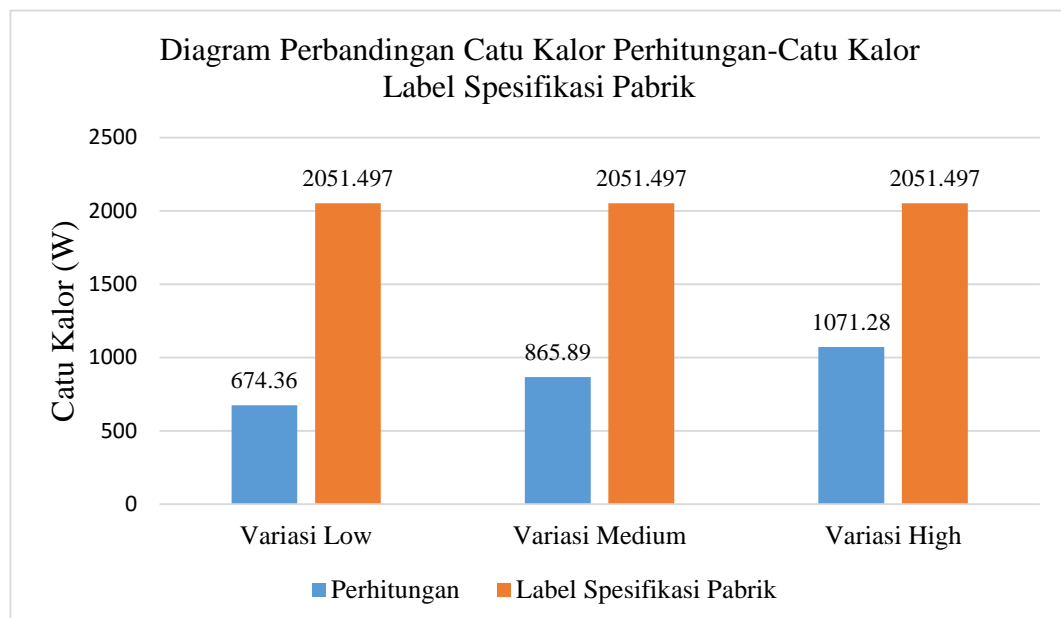
$U_{o,H}$	= Koefisien perpindahan kalor keseluruhan luar pipa pada variasi <i>high</i> (W/m <sup>2</sup> .K)
$A_o$	= Luasan bidang perpindahan kalor luar pipa (m <sup>2</sup> )
$F_H$	= Faktor koreksi LMTD pada variasi <i>high</i>
$LMTD_H$	= Beda temperatur rata-rata logaritmik pada variasi <i>high</i> (K)

### 4.3. Pembahasan

Setelah melakukan perhitungan catu kalor pada tiap variasi kecepatan udara bebas maka data akhir perhitungan diperoleh :

**Tabel 4.6** Hasil data perhitungan catu kalor

No	Variasi Kecepatan Udara	Catu Kalor (W)	
		Perhitungan	Label Spesifikasi Pabrik
1	<i>Low</i> (1,2 m/s)	674,36	2051,497
2	<i>Medium</i> (1,7 m/s)	865,89	
3	<i>High</i> (2,4 m/s)	1071,28	



**Gambar 4.3** Diagram perbandingan catu kalor perhitungan dengan catu kalor label spesifikasi pabrik

Hasil catu kalor pada tiap variasi kecepatan udara pada *blower* memiliki hasil lebih rendah dibandingkan catu kalor pada label spesifikasi pabrik. Hal tersebut disebabkan oleh asumsi sirip pada evaporator diabaikan. Jika menggunakan sirip luas permukaan perpindahan panas yang digunakan adalah luas permukaan total antara sirip dengan permukaan luar pipa dikalikan dengan efisiensi sirip, dengan demikian nilai catu kalor pada tiap variasi kecepatan udara pada *blower* akan memiliki hasil yang lebih besar.