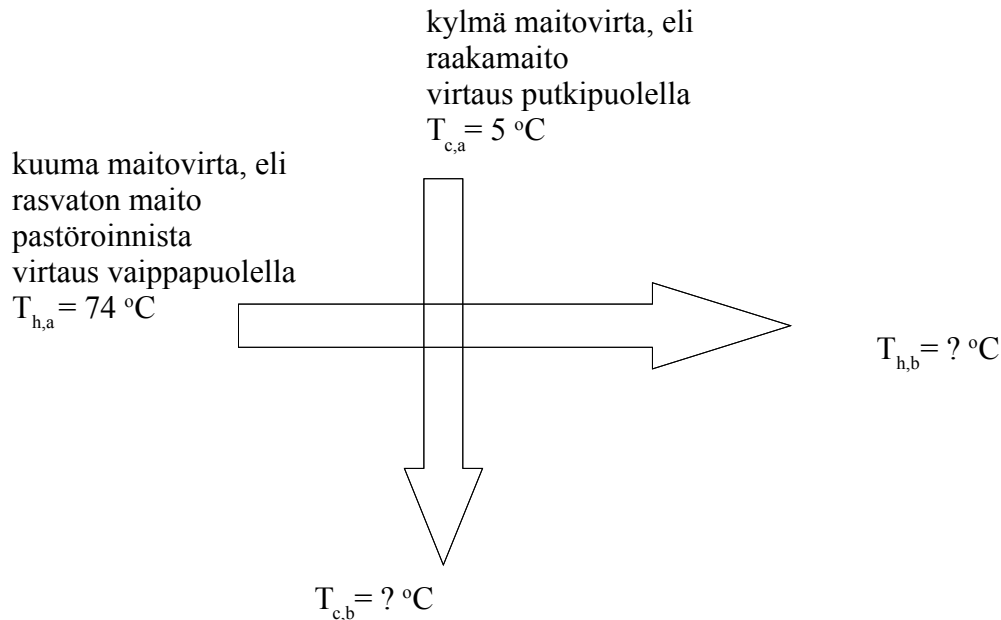


## Kuva lämmönsiirtoprosessista

Käytössä ristivirtalämmönvaihdin (molemmat puolet sekoittumattomat)



Käytetään tästä eteenpäin eri virtojen suureiden erottamiseksi kuumalle maitovirralle, eli rasvattomalle maidolle siis alaindeksiä h ja kylmälle maidolle, eli raakamaidolle alaindeksiä c.

Lasketaan entalpiataseita varten rasvattoman maidon massavirta. Tehtävänannossa sanotaan, että pastöroinnista tulevan virran osuus on yhtä suuri kuin separoinnista poistuvan virran, eli selkeämmin sanottuna raakamaidosta (rasvaprosentti 4,3%) on poistettu kaikki rasva.

$$\text{rasvattoman maidon massavirta} = (1-0,043) \cdot \text{raakamaidon massavirta} = 0,957 \cdot 24 \text{ kg/s} = 22,968 \text{ kg/s}$$

## Kohta A

Tehtävänannossa sanotaan, että kuumasta virrasta saadaan talteen 88 % lämmöstä ja että lämpötilat eivät mene ristiin ( $T_{h,b} - T_{c,b} = 5 \text{ °C}$ ). Nyt voidaan laskea entalpiataseet ja virtojen loppulämpötilat, kun tiedetään, että kuuma faasi luovuttaa yhtä paljon lämpöä, kuin kylmä vastaanottaa.

$Q_{\text{kuuma fluidivaasi luovuttaa}} = Q_{\text{kylmä fluidivaasi vastaanottaa}}$

$$\begin{aligned} q_h &= m_h \cdot c_h \cdot (T_{h,a} - T_{h,b}) = q_c = m_c \cdot c_c \cdot (T_{c,b} - T_{c,a}) \\ 0,88 \cdot 22,968 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \cdot (74 - T_{h,b}) \text{°C} &= 24 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \cdot (T_{c,b} - 5) \text{°C} \\ 80,8474 \frac{\text{kJ}}{\text{s} \cdot \text{°C}} \cdot (74 - T_{h,b}) \text{°C} &= 94,08 \frac{\text{kJ}}{\text{s} \cdot \text{°C}} \cdot (T_{c,b} - 5) \text{°C} \end{aligned}$$

$T_{h,b} - T_{c,b} = 5 \text{ °C} \rightarrow T_{h,b} = 5 + T_{c,b}$  , sijoitetaan tämä yllä olevaan yhtälöön ja saadaan:

$$80,8474 \frac{\text{kJ}}{\text{s}^\circ\text{C}} * (74 - (5 + T_{c,b}))^\circ\text{C} = 94,08 \frac{\text{kJ}}{\text{s}^\circ\text{C}} * (T_{c,b} - 5)^\circ\text{C}$$

$$80,8474 \frac{\text{kJ}}{\text{s}^\circ\text{C}} * (69 - T_{c,b})^\circ\text{C} = 94,08 \frac{\text{kJ}}{\text{s}^\circ\text{C}} * (T_{c,b} - 5)^\circ\text{C}$$

$$5578,4706 - 80,8474 T_{c,b} = 94,08 T_{c,b} - 470,4$$

$$174,9274 T_{c,b} = 6048,8706$$

$$T_{c,b} = 34,58^\circ\text{C}$$

$$T_{h,b} = 5 + T_{c,b} = 5 + 34,58 = 39,58^\circ\text{C}$$

**Kylmän maitovirran, eli raakamaidon loppulämpötila on siis noin 34,5 astetta ja kuuman, pastöroidun rasvattoman maidon loppulämpötila noin 39,5 astetta.**

## Kohta B

### **Lämmönsiirtokertoimien laskeminen.**

#### **Putkipuoli**

Lasketaan Reynoldsin luku putkipuolella, jotta tiedetään mitä konvektikorrelaatiota käytetään lämmönsiirtokertoimen laskemiseksi. Seuraavissa kaavoissa aineominaisuudet keskimääräisessä lämpötilassa on otettu tehtävänannon taulukosta.

$$Re_c = \frac{4 * \dot{m}}{\pi * D_i * \eta_c * N_p} \rightarrow Re_c = \frac{4 * 24 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\pi * 0,024 \text{ m} * 2,009 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{ms}} * 36} = \frac{96 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,0057 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 16\ 849$$

Kyseessä siis putken sisäpuolinen turbulenti virtaus, koska  $Re > 6000$ , käytetään raakamaidon lämmönsiirtokertoimen laskentaan prujujen kaavaa 73:

$$h_c = \frac{\lambda}{D_i} * 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,14}, \text{ tähän kaavaan tarvitaan ensin Prandtin lukua:}$$

$$Pr = \frac{c * \eta}{\lambda} \rightarrow \frac{3920 \frac{\text{J}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 2,099 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}{0,555 \frac{\text{W}}{\text{m} * ^\circ\text{C}}} \rightarrow Pr = 14,825$$

Sijoitetaan nyt kaikki luvut lämmönsiirtokertoimen laskukaavaan ja saadaan:

$$h_c = \frac{0,555 \frac{\text{W}}{\text{m} * ^\circ\text{C}}}{0,024 \text{ m}} * 0,023 * (16849)^{0,8} * (14,825)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{2,099 * 10^{-3} \text{ kg}}{0,535 * 10^{-3} \text{ ms}}\right)^{0,14} \rightarrow h_c = 3806,38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}}$$

**Lämmönsiirtokerroin putkipuolella on noin 3800 W/m<sup>2</sup>\*°C**

## Vaippapuoli

Toimitaan samoin kuin putkipuolellakin, kaikki aineominaisuudet keskimääräisessä lämpötilassa:

$$Re_h = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_o \cdot \eta_h \cdot N_p} \rightarrow Re_h = \frac{4 \cdot 22,968 \frac{kg}{s}}{\pi \cdot 0,03 m \cdot 0,444 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{ms} \cdot 36} = \frac{91,872 \frac{kg}{s}}{0,0015} \approx 61\ 000$$

Kyseessä siis vaippapuolen turbulenttinen ristivirtaus, käytetään kuumalle rasvattomalle maidolle prujujen kaavaa 89:

$$h_h = \frac{\lambda}{D_h} \cdot 0,287 \left( \frac{D_h \cdot G}{\eta} \right)^{0,61} \cdot \left( \frac{c \cdot \eta}{\lambda} \right)^{0,33} \cdot F_a$$

Vaippapuolen lämmönsiirtokerroimen antavaan kaavaan tarvitaan kuitenkin G, eli massavuon tiheys putkien suuntaisesti, joka saadaan tehtävänannon vinkin perusteella, eli kaavalla:  $G = \frac{\dot{m}}{S_b}$ , josta taas tuntematon  $S_b$  kaavalla:

$$S_b = 0,1955 \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \right) - N_p \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \right), \text{ sijoitetaan lukuarvot ja saadaan:}$$

$$S_b = 0,1955 \cdot \left( \frac{\pi \cdot (0,58 m)^2}{4} \right) - 36 \cdot \left( \frac{\pi \cdot (0,03 m)^2}{4} \right) \rightarrow S_b = 0,0262 m^2$$

Massavuon tiheys putkien suuntaisesti on siis:

$$G = \frac{\dot{m}}{S_b} \rightarrow G = \frac{22,968 \frac{kg}{s}}{0,0262 m^2} \rightarrow G = 876,449 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

Korrelaation laskemiseksi pitää tietää vielä mikä on järjestelykerroin  $F_a$ . Tämä saadaan, kun tiedetään Reynoldsin luku (Re), ja putkien väli/putkien ulkohalkaisija ( $p/D_o$ ).

$F_a$  on prujun taulukon mukaan noin 1,02, kun  $p/D_o = 0,06/0,03 = 2$  ja  $Re \approx 60\ 000$

Sijoitetaan kaikki arvot korrelaation laskemiseksi, ja saadaan:

$$h_h = \frac{0,625 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}{0,03 m} \cdot 0,287 \left( \frac{0,03 m \cdot 876,449 \frac{kg}{m^2 \cdot s}}{0,444 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{ms}} \right)^{0,61} \cdot \left( \frac{4000 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 0,444 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{ms}}{0,627 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} \right)^{0,33} \cdot 1,02$$
$$h_h = 7031,53 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

**Vaippapuolen konvektiokorrelaatio eli lämmönsiirtokerroin on noin 7030 W/m<sup>2</sup>·°C,**

Lasketaan kokonaislämmönsiirtokerrointa varten karakteristinen mitta/logaritminen halkaisija  $D_L$ .  
 $D_o$  = putken ulkohalkaisija ja  $D_i$  = sisähalkaisija.

$$D_L = \frac{D_o - D_i}{\ln \frac{D_o}{D_i}} \rightarrow D_L = \frac{(30 - 24)}{\ln \left(\frac{30}{24}\right)} \rightarrow D_L \approx 26,889 \text{ mm}$$

Kokonaislämmönsiirtokerroin  $U$ , eli keskimääräinen kokonaislämmönläpäisykerroin ulkohalkaisijaan perustuen. Huomioidaan putkipuolen ( $h_i$ ) ja vaippapuolen ( $h_o$ ) lämmönsiirtokerroimet ja seinämän ( $x$ ) lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ). Realistista likakerrosta ei kuitenkaan huomioida.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} * \frac{D_o}{D_i} + \frac{x}{\lambda} * \frac{D_o}{D_L} + \frac{1}{h_o}} \rightarrow U = \frac{1}{\frac{1}{3806,28} * \frac{30}{24} + \frac{0,003}{16,3} * \frac{30}{26,889} + \frac{1}{7031,53}} \rightarrow U = 1479,37 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

**Kokonaislämmönsiirtokerroin on siis noin 1480 W/m<sup>2</sup>\*°C**

Lasketaan seinämän lämpötila:  $\bar{T}_h$  = kuuman virran keskilämpötila,  $D_h$  = kuuman vaippapuolen halkaisija ja  $D_c$  = kylmän putkipuolen halkaisija.

$$T_w = \bar{T}_h - \frac{1}{1 + \frac{D_h * h_h}{D_c * h_c}} * \Delta T \rightarrow T_w = \frac{(74 + 39,58)}{2} - \frac{1}{1 + \frac{0,03 * 7031,53}{0,024 * 3806,28}} * 37$$

$$T_w = 56,79 - 11,18 = 45,61^\circ C$$

jossa siis  $\Delta T$  = virtaavien aineiden välinen keskimääräinen lämpötilaero, eli kuuman virran keskilämpötila – kylmän virran keskilämpötila

$$\Delta T = \bar{T}_h - \bar{T}_c = \frac{(T_{h,a} + T_{h,b})}{2} - \frac{(T_{c,a} + T_{c,b})}{2} = \frac{(74 + 39,58)}{2} - \frac{(5 + 34,58)}{2} = 56,79 - 19,79 = 37^\circ C$$

**Seinämän lämpötila on noin 45,6 astetta**

## Kohta C

Lämpövirran yhtälö lämmönsiirtimille:  $q = UA \Delta T_{LM} F$

Lasketaan tätä varten logaritminen lämpötilaero: Oletetaan, että ominaislämmöt ja lämmönläpäisykerroin ovat vakioita ja systeemissä ei ole lämpöhäviöitä.

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{h,a} - T_{c,a}) - (T_{h,b} - T_{c,b})}{\ln \frac{(T_{h,a} - T_{c,a})}{(T_{h,b} - T_{c,b})}} \rightarrow \Delta T_{LM} = \frac{(74 - 5) - (39,58 - 34,58)}{\ln \frac{(74 - 5)}{(39,58 - 43,58)}}$$
$$\Delta T_{LM} = \frac{(69) - (5)}{\ln \frac{(69)}{(5)}} \rightarrow \Delta T_{LM} = \frac{64}{\ln 13,8} = 24,39^\circ C$$

Korjauskertoimen, eli F:n määrittäminen taulukkokirjasta,  $F = (P, R)$  (Keskinen s. 74). Parametrit P ja R lasketaan vaippapuolen (T) ja putkipuolen (t) fluidin lämpötilojen avulla.

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{34,58 - 5}{74 - 5} = 0,43$$
$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{74 - 39,58}{34,58 - 5} = 1,16$$

Näiden perusteella katsotaan taulukkokirjasta  $F \approx 0,92$

Lämmönsiirtopinta-ala voidaan nyt laskea siis ylemmästä lämpövirran yhtälöstä.

$$A = \frac{q}{U \Delta T_{LM} F} \rightarrow A = \frac{\dot{m}_c * c_c * (T_{c,b} - T_{c,a})}{U \Delta T_{LM} F} \rightarrow A = \frac{24 \frac{kg}{s} * 3920 \frac{J}{kg * ^\circ C} * (34,58 - 5)^\circ C}{1479,36 \frac{W}{m^2 * ^\circ C} * 24,39^\circ C * 0,92}$$
$$A = 83,83 m^2$$

**Lämmönsiirtopinta-ala on noin 84 neliometriä**