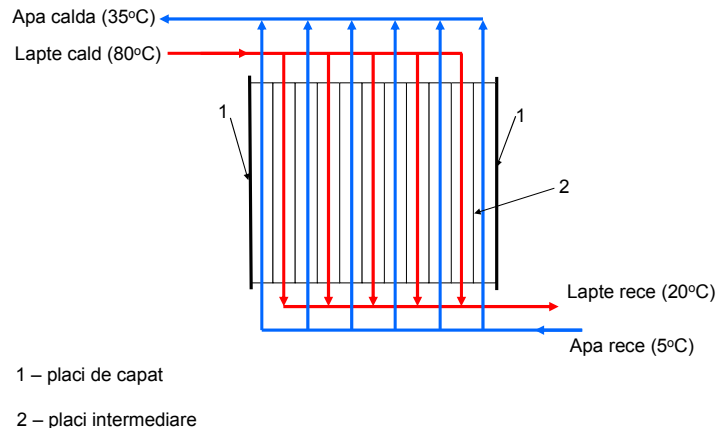


Examen la disciplina: Fenomene de transfer

Se consideră o secțiune dintr-un pasteurizator din industria laptelui. Această secțiune este un schimbător de căldură cu plăci (SCP), alcătuit din 2 plăci de capăt (1) și 10 plăci intermediare (2) printre care circulă alternativ, în contracurent următoarele fluide:

- laptele pasteurizat, care se răcește de la 80 la 20 °C;
- agentul termic (apa de răcire), care se încălzește de la 5 la 35°C.

Debitele de apă, respectiv lapte, se împart fiecare, în mod egal, prin cele 6, respectiv 5 secțiuni de curgere.



Cerinte:

- (2 puncte)** Să se calculeze: (a) viteza de curgere a apei prin schimbător; (b) valoarea criteriului Re pentru apă; (c) valoarea criteriului Pr pentru apă; (d) să se precizeze regimul de curgere al apei printre 2 plăci intermediare alăturate, știind că:
 - Debitul de alimentare cu apă al SCP este de 90 kg/s;
 - Proprietățile medii ale apei se consideră a fi: densitatea de 1 kg/L; capacitatea termică de 3,18 kJ/(kg.K); conductivitatea termică de 0,6 W/(m.K), viscozitatea dinamică de 1 mPa.s;
 - Distanța dintre două plăci alăturate este de 10 mm;
 - Plăcile sunt confecționate din oțel inoxidabil (cu $\lambda = 17,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), au o înălțime de 1m, o lățime de 50 cm și o grosime de 2 mm.
- (3 puncte)** Ce debit de lapte cald (exprimat în kg/s și L/h) poate fi răcit în schimbător în condițiile în care:
 - Debitul de agent termic la intrarea în schimbător este de 60 L/s;
 - Pierderile de căldură în mediul exterior sunt nule;
 - Proprietățile termofizice ale celor 2 fluide sunt cele redată în tabelul 1.

Tabelul 1. Proprietăți termofizice ale apei și laptelui în funcție de temperatură

Proprietatea	UM	Apă de răcire		Lapte pasteurizat	
Temperatură	°C	5	35	80	20
Densitate	kg/m ³	1000	996	1020	1000
Viscozitate dinamică	mPa.s	1,1	0,99	2,2	0,6
Capacitate termică masică	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	3180	3190	3935	4005
Conductivitate termică	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,55	0,65	0,54	0,50

- (2 puncte)** Să se calculeze coeficientul individual de transfer de căldură al apei, știind că:
 - Viteza de curgere a apei printre plăci este de 120 m/min;
 - Caracteristicile termofizice ale apei sunt cele din tabelul 1;
 - Caracteristicile plăcilor SCP sunt cele de la punctul 1.
- (2 puncte)** Ce valoare au coeficientul global de transfer de căldură și ΔT_m (calculat pentru curgerea în echicurent și contracurent) știind că:
 - $\alpha_{\text{apă}} = 5,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
 - $\alpha_{\text{lapte}} = 3,9 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
 - Caracteristicile plăcilor SCP sunt cele de la punctul 1
 - Apa produce un strat de crustă (depuneri) gros de 100 μm și cu o conductivitate termică de $1,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

REZOLVARE

Subiectul 1

Debitul total de apă care parcurge SCP este de 90 kg/s. Acest debit se împarte în mod egal pe cele 6 secțiuni de curgere. Debitul de apă care trece printr-o secțiune va fi:

$$m_{mS} = \frac{m_m}{N} = \frac{90}{6} = 15 \text{ kg/s}$$

Viteza de curgere se determină din ecuația debitului:

$$m_{vS} = v \times A \rightarrow v = \frac{m_{vS}}{A}$$

Debitul volumic se exprimă în funcție de debitul masic prin secțiune și densitatea apei:

$$m_{vS} = \frac{m_{mS}}{\rho} = \frac{15}{1000} \text{ m}^3/\text{s} = 0,015 \text{ m}^3/\text{s}$$

Secțiunea de curgere este dreptunghiulară și aria sa este dată de produsul dintre distanța dintre două plăci alăturate (b) și lățimea unei plăci (l):

$$A = b \times l = 0,01 \times 0,5 = 0,005 \text{ m}^2$$

Viteza de curgere va fi:

$$v = \frac{m_{vS}}{A} = \frac{0,015}{0,005} = 3 \text{ m/s} \quad (0,5 \text{ puncte})$$

Valoarea criteriului Re pentru apă se calculează cu relația:

$$Re = \frac{\rho \times v \times d_{ech}}{\mu} \text{ în care diametrul echivalent al secțiunii de curgere } (d_{ech}) \text{ este:}$$

$$d_{ech} = 4 \frac{A}{P_u} = 4 \frac{b \times l}{2(b+l)} = 2 \frac{0,005}{0,501} = 0,01996 \text{ m} \cong 0,02 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times d_{ech}}{\mu} = \frac{1000 \times 3 \times 0,02}{0,001} = 60000 \quad (0,5 \text{ puncte})$$

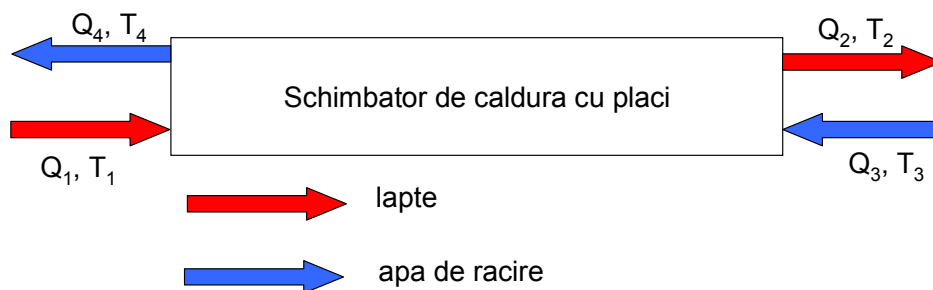
Deoarece $Re > 10000$, regimul de curgere este turbulent. (0,5 puncte)

Criteriul lui Prandtl se calculează cu relația:

$$Pr = \frac{c_p \times \mu}{\lambda} = \frac{3180 \times 0,001}{0,6} = 5,3 \quad (0,5 \text{ puncte})$$

Subiectul 2

Schema de principiu a SCP, cu evidențierea fluxurilor termice și a temperaturilor:



Ecuația generală de bilanț termic a SCP, în absența pierderilor de căldură în exterior:

$$Q_1 + Q_3 = Q_2 + Q_4, \text{ echivalent cu: } Q_1 - Q_2 = Q_4 - Q_3$$

Cele 2 fluide neschimbându-și starea de agregare:

$$Q_1 = m_{m1} \times c_{p1} \times T_1$$

$$Q_2 = m_{m1} \times c_{p2} \times T_2$$

$$Q_3 = m_{m3} \times c_{p3} \times T_3$$

$$Q_4 = m_{m3} \times c_{p4} \times T_4$$

Înlocuind în ecuația generală de bilanț termic termenii $Q_1 \div Q_4$ se obține expresia debitului masic de lapte vehiculat prin SCP:

$$m_{m1} = m_{m3} \times \frac{c_{p4}T_4 - c_{p3}T_3}{c_{p1}T_1 - c_{p2}T_2} \quad \text{Cu debitul } m_{m3} \text{ dat (90 kg/s) și cu valorile proprietăților termofizice din Tabelul$$

1 se obține debitul masic de lapte la intrare în SCP:

$$m_{m1} = m_{m3} \times \frac{c_{p4}T_4 - c_{p3}T_3}{c_{p1}T_1 - c_{p2}T_2} = 60 \times \frac{3190 \times 35 - 3180 \times 5}{3935 \times 80 - 4005 \times 20} = 24,478 \text{ kg/s (2 puncte)}$$

Debitul volumic de lapte cald se află din ecuația densității, cu valoarea densității laptelui la intrare în SCP (80°C):

$$m_{v1} = \frac{m_{m1}}{\rho} = \frac{24,478}{1020} = 0,024 \text{ m}^3/\text{s} = 24 \text{ L/s} = 86393 \text{ L/h (1 punct)}$$

Subiectul 3

Se calculează valoarea criteriului Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \times v \times d_{ech}}{\mu}$$

Diametrul echivalent al secțiunii de curgere (d_{ech}) este:

$$d_{ech} = 4 \frac{A}{P_u} = 4 \frac{b \times l}{2(b+l)} = 2 \frac{0,005}{0,501} = 0,01996 \text{ m} \cong 0,02 \text{ m}$$

Viteza de curgere a apei este $v = 120 \text{ m/min} = 120/60 \text{ m/s} = 2 \text{ m/s}$

Densitatea și viscozitatea apei se calculează la temperatura medie a apei: $(5 + 35)/2 = 20^\circ\text{C}$

$$\rho = 0,5 \times (\rho_5 + \rho_{35}) = 0,5 \times (1000 + 996) = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,5 \times (\mu_5 + \mu_{35}) = 0,5 \times (1,1 + 0,99) = 1,045 \text{ mPa}\cdot\text{s} = 0,001045 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times d_{ech}}{\mu} = \frac{998 \times 2 \times 0,02}{0,001045} = 38200,96 \cong 38201 > 10000 \rightarrow \text{regim turbulent}$$

În continuare se alege ecuația criterială pentru calculul coeficientului individual de transfer termic, α .

Se poate folosi ecuația valabilă la transferul termic prin conducte și canale (4.137 – din manual):

$$Nu = 0,021 \times \varepsilon_l \times Re^{0,8} \times Pr^{0,43} \times \left(\frac{Pr}{Pr_p} \right)^{0,25}$$

sau ecuația transferului convectiv la curgerea de-a lungul unei suprafețe plane (4.153 – din manual):

$$Nu = 0,66 \times Re^{0,5} \times Pr^{0,33} \times \left(\frac{Pr}{Pr_p} \right)^{0,25}$$

Ambele ecuații se consideră a fi corect alese și se punctează **(1 punct)**.

În primul caz:

$$Nu = 0,021 \times \varepsilon_l \times Re^{0,8} \times Pr^{0,43} \times \left(\frac{Pr}{Pr_p} \right)^{0,25}$$

ε_l depinde de valoarea raportului L/d_{ech} și Re : $L/d_{ech} = 1/0,02 = 50$, $Re > 10000 \rightarrow \varepsilon_l = 1$

Deoarece apa se încălzește, raportul $(Pr/Pr_p)^{0,25} = 1$.

Valoarea criteriului Pr se calculează cu proprietățile termofizice ale apei la temperatura medie din SCP (20°):

$$Pr = \frac{c_p \times \mu}{\lambda} = \frac{3185 \times 0,001045}{0,6} = 5,547$$

$$Nu = 0,021 \times 38201^{0,8} \times 5,547^{0,43} = 203,15$$

$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda}{d_{ech}} = \frac{203,15 \times 0,6}{0,02} = 6094,5 \frac{W}{m^2 \times K} \quad (1 \text{ punct})$$

În al doilea caz:

$$Pr = \frac{c_p \times \mu}{\lambda} = \frac{3185 \times 0,001045}{0,6} = 5,547$$

$$Nu = 0,66 \times Re^{0,5} \times Pr^{0,33} \times \left(\frac{Pr}{Pr_p} \right)^{0,25} = 0,66 \times 38201^{0,5} \times 5,547^{0,33} = 227,05$$

$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda}{d_{ech}} = \frac{227,05 \times 0,6}{0,02} = 6811,5 \frac{W}{m^2 \times K} \quad (1 \text{ punct})$$

Subiectul 4

Calculul coeficientului global de transfer de căldură

Se folosește ecuația pentru transferul prin pereți plani:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ în care:}$$

δ_1 = grosimea plăcii SCP (2 mm = 0,002 m)

δ_2 = grosimea depunerii de crustă (100 μ m = 0,1 mm = 0,0001 m)

λ_1 = conductivitatea termică a plăcii SCP (17,5 W/(m.K));

λ_2 = conductivitatea termică a depunerii de crustă (1,03 W/(m.K));

α_1 = coeficientul individual de transfer de căldură pentru apă (5,5 kW/(m².K) = 5500 W/(m².K));

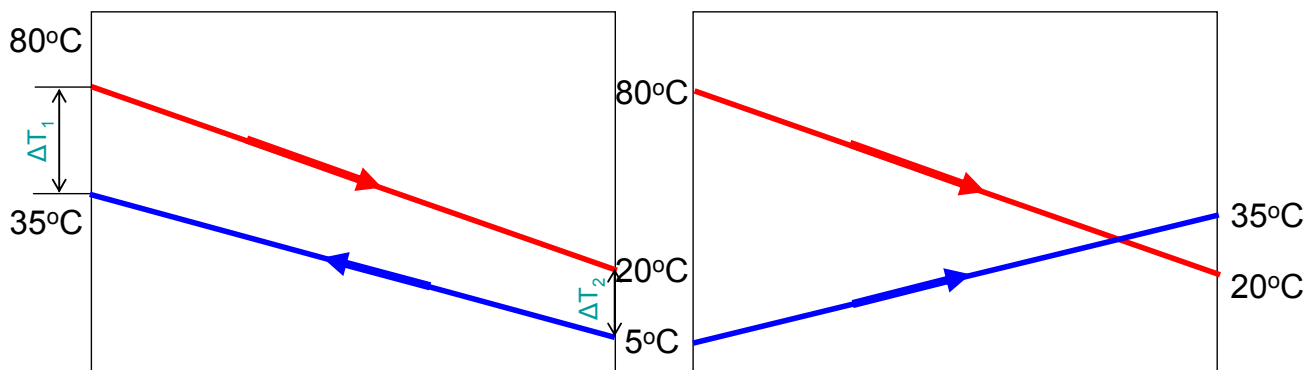
α_2 = coeficientul individual de transfer de căldură pentru lapte (3,9 kW/(m².K) = 3900 W/(m².K));

Înlocuind valorile numerice în ecuație:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{5500} + \frac{0,002}{17,5} + \frac{0,0001}{1,03} + \frac{1}{3900}} = 1539,4 \frac{W}{m^2 \times K} \quad (0,5 \text{ puncte})$$

Calculul potențialului mediu al transferului termic

Mai întâi se trasează diagramele termice ale SCP în cele 2 variante de funcționare: contracurent, respectiv echicurent (0,5 puncte) :



Curgere in contracurent

Curgere in echicurent

Calculul ΔT_m pentru circulația în contracurent:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(80 - 35) - (20 - 5)}{\ln \frac{80 - 35}{20 - 5}} = \frac{45 - 15}{\ln \frac{45}{15}} = \frac{30}{\ln 3} = 27,31 \text{ K} = 27,31^\circ\text{C} \text{ (0,5 puncte)}$$

Calculul ΔT_m pentru circulația în echicurent:

Circulația în contracurent nu este posibilă în condițiile de temperatură ale problemei, întrucât curbele de variație a temperaturilor se intersectează în interiorul utilajului. În punctul de intersecție $\Delta T = 0$ și transferul de căldură între fluide încetează. **(0,5 puncte)**