

1. In un impianto si deve riscaldare acqua e sale da 6°C a 12°C in uno scambiatore di calore a tubi concentrici, per mezzo di acqua che entra a 50°C e esce a 40°C con una portata di 0.166Kg/s. Se il coefficiente totale di scambio termico è 850 W/m<sup>2</sup>K, qual è l'area richiesta per lo scambiatore a) in equicorrente o b) in controcorrente?

Ris. a) A=0.23m<sup>2</sup> b) A=0.23m<sup>2</sup>

Facciamo un bilancio sullo scambiatore

$$Q = -w_h C_{p_h} [T_{ho} - T_{hi}] = w_c C_{p_c} [T_{co} - T_{ci}] \quad (\text{è positivo il calore fornito dal fluido caldo})$$

inoltre

$$Q = U_{in} \cdot A_{in} \Delta T_{ml} \quad \text{con} \quad \Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] \quad \text{dove } Q \text{ è sempre positivo}$$

e  $\Delta T_{ml}$  è sempre positivo

La portata di calore ceduta dall'acqua è

$$Q_a = w C_p (T_o - T_i) \quad \text{dove } C_p \text{ è valutato alla temperatura media di bulk che vale } 45^\circ\text{C} = 318\text{K}$$

$$C_{p_{45}} = 4177 \text{ J/KgK}$$

$$Q_a = 0.166 \text{ Kg/s} \cdot 4177 \text{ J/KgK} \cdot (10) \text{K} = 6933 \text{ W}$$

$$\text{Supponiamo lo scambiatore in } \mathbf{equicorrente}: (T_{hi} - T_{ci}) = 50^\circ\text{C} - 6^\circ\text{C} = 44^\circ\text{C}$$

$$(T_{ho} - T_{co}) = 40^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C} = 28^\circ\text{C}$$

Calcoliamo la differenza di temperatura media logaritmica

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] = [28\text{K} - 44\text{K}] / \ln[28\text{K} / 44\text{K}] = 35.4\text{K}$$

$$Q = U \cdot A \Delta T_{ml} \rightarrow A = Q / (U \Delta T_{ml}) = 6933 \text{ W} / (850 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 35.4\text{K}) = 0.23\text{m}^2$$

$$\text{Supponiamo lo scambiatore in } \mathbf{controcorrente}: (T_{hi} - T_{ci}) = 50^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C} = 38^\circ\text{C}$$

$$(T_{ho} - T_{co}) = 40^\circ\text{C} - 6^\circ\text{C} = 34^\circ\text{C}$$

Calcoliamo la differenza di temperatura media logaritmica

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] = [34\text{K} - 38\text{K}] / \ln[34\text{K} / 38\text{K}] = 35.96\text{K}$$

$$Q = U \cdot A \Delta T_{ml} \rightarrow A = Q / (U \Delta T_{ml}) = 6933 \text{ W} / (850 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 35.96\text{K}) = 0.23\text{m}^2$$

2. Per riscaldare acqua da 40°C a 80°C si usa uno scambiatore con dell'olio caldo, con portata di 0.1Kg/s. L'olio entra a 105°C ed esce dallo scambiatore a 70°C. Trovare la superficie di scambio se il coefficiente di scambio complessivo è 300W/m<sup>2</sup>K e lo scambiatore opera in controcorrente.

Ris. A=2.03m<sup>2</sup>

Il calore necessario per riscaldare l'acqua è  $Q = w C_p (T_{co} - T_{ci})$

$$C_{p_{60}} = 4185 \text{ J/KgK} \quad Q = w C_p (T_{co} - T_{ci}) = 0.1 \text{ Kg/s} \cdot 4185 \text{ J/KgK} \cdot 40\text{K} = 16740 \text{ W}$$

L'area di scambio è data da  $A = Q / (U \Delta T_{ml})$

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i]$$

Lo scambiatore opera in **controcorrente**:

$$(T_{hi} - T_{ci}) = 105^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C}$$

$$(T_{ho} - T_{co}) = 70^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] = (25 - 30) \text{K} / \ln(25/30) = 27.4\text{K}$$

$$A=Q/(U \Delta T_{ml})= 16740W/(300W/m^2K \cdot 27.4K)=2.03m^2$$

3. In uno scambiatore di calore, dell'olio con portata 0.6Kg/s deve essere raffreddato da 389K a 354K. Si utilizza acqua con una portata di 0.3Kg/s ed una temperatura iniziale di 281K. Se il calore specifico dell'olio è 1880J/KgK e quello dell'acqua è 4177J/KgK (entrambi possono essere considerati costanti) ed il coefficiente complessivo di scambio termico è 275W/m<sup>2</sup>K, calcolare a) la temperatura di uscita dell'acqua e b) l'area di scambio necessaria per lo scambiatore in equicorrente e c) in controcorrente.

$$\text{Ris. a) } T_{f,out}= 312K \text{ b) } A=2.05m^2 \text{ c) } A=1.91m^2$$

La portata scambiata dall'olio è

$$Q=w_c C_{p_c} (T_{c,in}-T_{c,out})=0.6Kg/s \cdot 1880J/KgK \cdot (389-354)K=39480W$$

La temperatura di uscita dell'acqua è

$$T_{f,out}=T_{f,in}+Q/(w_f \cdot C_{p_f})=281K+39480W/(0.3Kg/s \cdot 4177J/KgK)=312K$$

Supponiamo lo scambiatore in **equicorrente**:  $\Delta T_i=(T_{c,in}-T_{f,in})=389K-281K=108K$

$$\Delta T_o=(T_{c,out}-T_{f,out})=354K-312K=42K$$

Calcoliamo la differenza di temperatura media logaritmica

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] = 69.9K$$

$$Q=U \cdot A \Delta T_{ml} \rightarrow A=Q/(U \Delta T_{ml}) = 39480W/(275W/m^2K \cdot 69.9K)=2.05m^2$$

Supponiamo lo scambiatore in **controcorrente**:  $\Delta T_i=(T_{c,in}-T_{f,out})=389K-312K=77K$

$$\Delta T_o=(T_{c,out}-T_{f,in})=354K-281K=73K$$

Calcoliamo la differenza di temperatura media logaritmica

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] = 74.98K$$

$$Q=U \cdot A \Delta T_{ml} \rightarrow A=Q/(U \Delta T_{ml}) = 39480W/(275W/m^2K \cdot 74.98K)=1.91m^2$$

4. Una soluzione di alcol etilico al 95% ( $C_p=3807J/KgK$ ) con portata 7.3Kg/s deve essere raffreddata da 60°C a 38°C. Si intende utilizzare acqua ad una temperatura di 7.5°C con portata 6.55Kg/s. Se lo scambiatore è formato da 80 tubi con diametro esterno di 5.1cm, ed il coefficiente totale di scambio termico è 681W/m<sup>2</sup>K, calcolare la lunghezza dei tubi a) per uno scambiatore in controcorrente, b) per uno scambiatore in equicorrente

$$\text{Ris. a) } L=2.93m \text{ b) } L=2.31m$$

La portata scambiata dalla soluzione è

$$Q=w_c C_{p_c} (T_{c,in}-T_{c,out})=7.3Kg/s \cdot 3807J/KgK \cdot (60-38)K=611 \text{ kW}$$

La temperatura di uscita dell'acqua è incognita.

Impongo 14.5°C e trovo  $T_{media}=11 \rightarrow C_{p_f}=4187$

$$T_{f,out}=T_{f,in}+Q/(w_f \cdot C_{p_f})=280.5K+611404W/(6.55Kg/s \cdot 4187J/KgK)=302.8K \approx 30^\circ C$$

Impongo 30°C e trovo  $T_{media}=18.75 \rightarrow C_{p_f}=4179$

$$T_{f,out}=T_{f,in}+Q/(w_f \cdot C_{p_f})=280.5K+611404W/(6.55Kg/s \cdot 4179J/KgK)=302.8K \approx 30^\circ C$$

$$T_{f,out}=302.8K \approx 30^\circ C$$

Supponiamo lo scambiatore in **equicorrente**:  $\Delta T_i = (T_{c,in} - T_{f,in}) = 333\text{K} - 280.5\text{K} = 52.5\text{K}$   
 $\Delta T_o = (T_{c,out} - T_{f,out}) = 311\text{K} - 302.8\text{K} = 8.2\text{K}$

Calcoliamo la differenza di temperatura media logaritmica

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] = 23.9\text{K}$$

$$Q = U \cdot A \Delta T_{ml} \rightarrow A = Q / (U \Delta T_{ml}) = 611 \text{ kW} / (681 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 23.9\text{K}) = 37.6 \text{ m}^2$$

$$L = A / (80\pi D) = 37.6 \text{ m}^2 / (80 \pi \cdot 0.051) = 2.93 \text{ m}$$

Supponiamo lo scambiatore in **controcorrente**:  $\Delta T_i = (T_{c,in} - T_{f,out}) = 333\text{K} - 302.8\text{K} = 30.2\text{K}$   
 $\Delta T_o = (T_{c,out} - T_{f,in}) = 311\text{K} - 280.5\text{K} = 30.5\text{K}$

Calcoliamo la differenza di temperatura media logaritmica

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] = 30.3\text{K}$$

$$Q = U \cdot A \Delta T_{ml} \rightarrow A = Q / (U \Delta T_{ml}) = 611 \text{ kW} / (681 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 30.3\text{K}) = 29.6 \text{ m}^2$$

$$L = A / (80\pi D) = 29.6 \text{ m}^2 / (80 \pi \cdot 0.051) = 2.31 \text{ m}$$

5. Una portata  $w_c = 0.56 \text{ Kg/s}$  di un olio ( $Cp_c = 2500 \text{ J/kg K}$ ) viene raffreddata in uno scambiatore di calore a tubi concentrici passando da  $T_{c,in} = 363 \text{ K}$  a  $T_{c,out} = 313 \text{ K}$  per mezzo di acqua in controcorrente. L'acqua passa da  $T_{f,in} = 293 \text{ K}$  a  $T_{f,out} = 313 \text{ K}$ . L'olio viene inviato nel tubo interno, di diametro  $D_i = 1 \text{ cm}$ ; il coefficiente di scambio convettivo per l'olio vale  $h_c = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; l'acqua viene inviata nel tubo esterno, in una sezione anulare di diametro massimo  $D_o = 1.5 \text{ cm}$ . Lo spessore del tubo interno è trascurabile. a) calcolare la portata richiesta per l'acqua. b) calcolare la lunghezza dello scambiatore. Considerare per l'acqua le seguenti proprietà:  $Cp = 4180 \text{ J/kgK}$ ,  $\rho = 990 \text{ Kg/m}^3$ ,  $k = 0.64 \text{ W/mK}$ ,  $\mu = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m s}$

Ris. a)  $w_f = 0.84 \text{ Kg/s}$  b)  $L = 27.5 \text{ m}$

La portata termica scambiata dall'olio è

$$Q = w_c Cp_c (T_{c,in} - T_{c,out}) = 0.56 \text{ Kg/s} \cdot 2500 \text{ J/KgK} \cdot (363 - 313) \text{ K} = 70 \text{ kW}$$

La portata massica dell'acqua si può ricavare dal bilancio sul fluido freddo

$$w_f = Q / [Cp_f (T_{f,out} - T_{f,in})] = 70 \text{ kW} / [4180 \text{ J/KgK} \cdot (313 - 293) \text{ K}] = 0.84 \text{ Kg/s}$$

La lunghezza dello scambiatore si può ricavare dalla relazione

$$Q = U \cdot A \Delta T_{ml}$$

$$U = [1/h_c + 1/h_f]^{-1}$$

Il coefficiente  $h_c = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$

Calcoliamo il coefficiente di scambio termico per l'acqua:

La lunghezza caratteristica è il diametro idraulico:  $D_h = 4A/P_b = D_o - D_i = 0.5 \text{ cm}$

La velocità media vale:  $v = w_f / [\rho \pi D_i^2 / 4] = 0.84 \text{ Kg/s} / [990 \text{ Kg/m}^3 \pi \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / 4] = 2.7 \text{ m/s}$

$Re = \rho v D_h / \mu = 990 \text{ Kg/m}^3 \cdot 2.7 \text{ m/s} \cdot 0.005 \text{ m} / (0.6 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m s}) = 22275$

$Pr = Cp \mu / k = 4180 \text{ J/kgK} \cdot 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m s} / (0.64 \text{ W/mK}) = 3.92$

La correlazione da utilizzare per Nusselt è

$$Nu = 0.026 Re^{0.8} Pr^{1/3} = 0.026 \cdot 22275^{0.8} \cdot 3.92^{1/3} = 123$$

Da cui  $h = Nu k / D_h = 123 \cdot 0.64 \text{ W/mK} / 0.005 \text{ m} = 15744 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$U = [1/500 + 1/15744]^{-1} \text{ W/m}^2\text{K} = 485 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Lo scambiatore opera in **controcorrente**:  $\Delta T_i = (T_{c,in} - T_{f,out}) = 363\text{K} - 313\text{K} = 50\text{K}$   
 $\Delta T_o = (T_{c,out} - T_{f,in}) = 313\text{K} - 293\text{K} = 20\text{K}$

Calcoliamo la differenza di temperatura media logaritmica

$$\Delta T_{ml} = [\Delta T_o - \Delta T_i] / \ln[\Delta T_o / \Delta T_i] = 32.8\text{K}$$

$$Q = U \cdot A \Delta T_{ml} \rightarrow A = Q / (U \Delta T_{ml}) = 70 \text{ kW} / (485 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 32.8\text{K}) = 4.4 \text{ m}^2$$

$$L = A / (\pi D) = 4.4 \text{ m}^2 / (\pi \cdot 0.01) = 140 \text{ m}$$