



Esercizi SU Scambiatori DI Calore

Fisica tecnica e impianti energetici (Università Telematica Internazionale UniNettuno)



Scansiona per aprire su Studocu

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

ESERCIZI SU SCAMBIATORI DI CALORE**ESERCIZIO 1**

Determinare l'area della superficie di uno scambio termico di uno scambiatore di calore realizzato con un tubo avente il diametro esterno di 25 mm, in cui si devono raffreddare 26000 kg/h di una soluzione di alcool etilico al 95% ($c_p=3.81 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) da 66°C a 40°C mediante 22000 kg/h di acqua disponibile a 10°C . Quale coefficiente globale di trasmissione, K , riferito alla superficie esterna, si assuma il valore di $581 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$. Considerare i casi di ; a) equicorrente pura e b) controcorrente pura e calcolare, inoltre l'efficienza dei due scambiatori

SOLUZIONE

La temperatura di uscita dell'acqua può essere ottenuta dal bilancio globale di energia supponendo trascurabili le dispersioni di calore verso l'esterno. Per piccole cadute di pressione all'interno dello scambiatore, se non vi sono cambiamenti di stato e se i calori specifici possono ritenersi costanti lungo il percorso, variano, cioè, poco in funzione della temperatura, il bilancio si può scrivere nel modo seguente:

$$Q = m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1i} - T_{1u}) = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{2u} - T_{2i})$$

Dove

 m : portata in massa

I pedici 1 e 2 stanno ad indicare il fluido caldo e il fluido freddo, mentre i pedici i e u i valori della temperatura del fluido in corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita dallo scambiatore.

Sostituendo i valori, si ha:

$$26000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 3.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot (66 - 40)^\circ\text{C} = 22000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot (T_{2u} - 10)^\circ\text{C}$$

Quindi:

$$T_{2u} = 38^\circ\text{C}$$

La potenza termica scambiata viene calcolata con la medesima espressione con riferimento al fluido caldo o al fluido freddo:

$$Q = m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1i} - T_{1u}) = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{2u} - T_{2i})$$

Facendo riferimento al fluido caldo, si ha:

$$Q = 26000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 3.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot 26^\circ\text{C} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} = 715 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 715 \text{ kW}$$

Per determinare l'area della superficie di scambio si utilizza l'espressione:

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T_m$$

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

Dove il ΔT_m , differenza media logaritmica delle temperature, corrisponde alla seguente espressione:

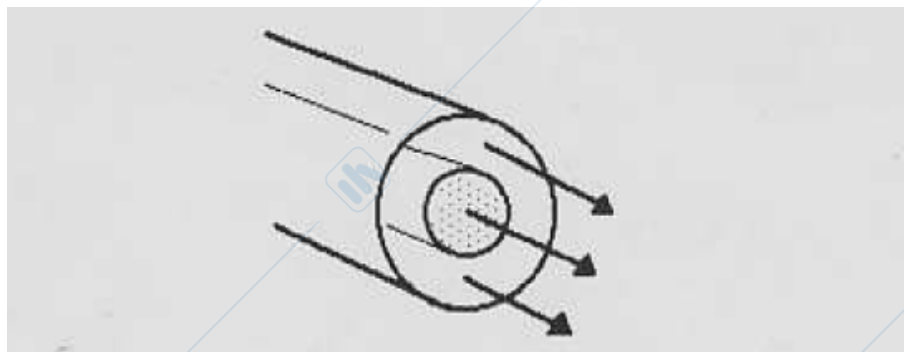
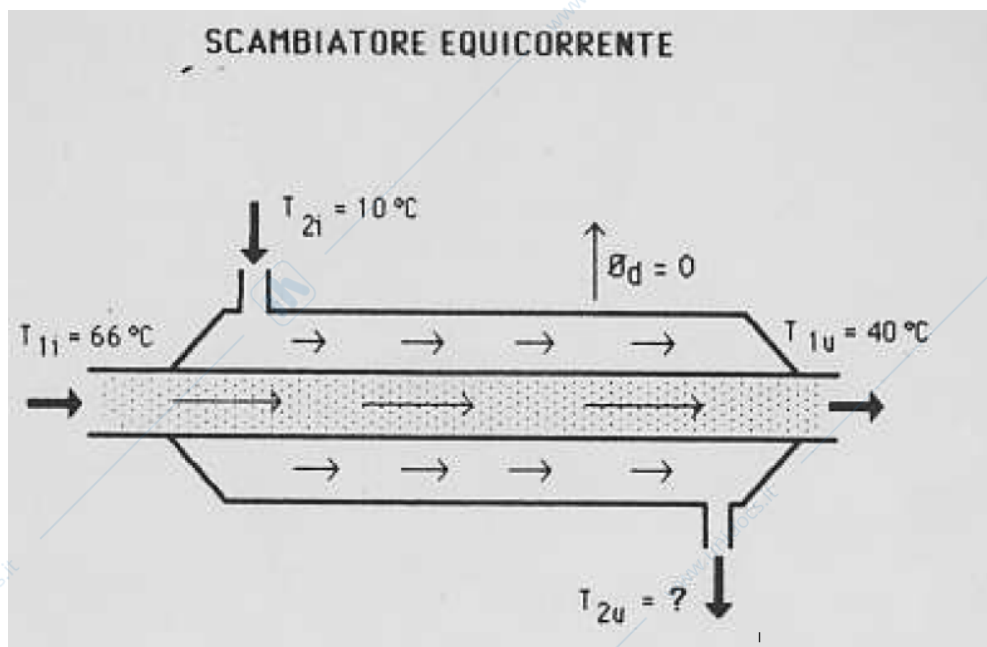
$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_s}{\ln(\Delta T_0 / \Delta T_s)}$$

Dove i pedici 0 e s sono indicate le differenze di temperatura tra i fluidi caldo e freddo in corrispondenza delle estremità dello scambiatore.

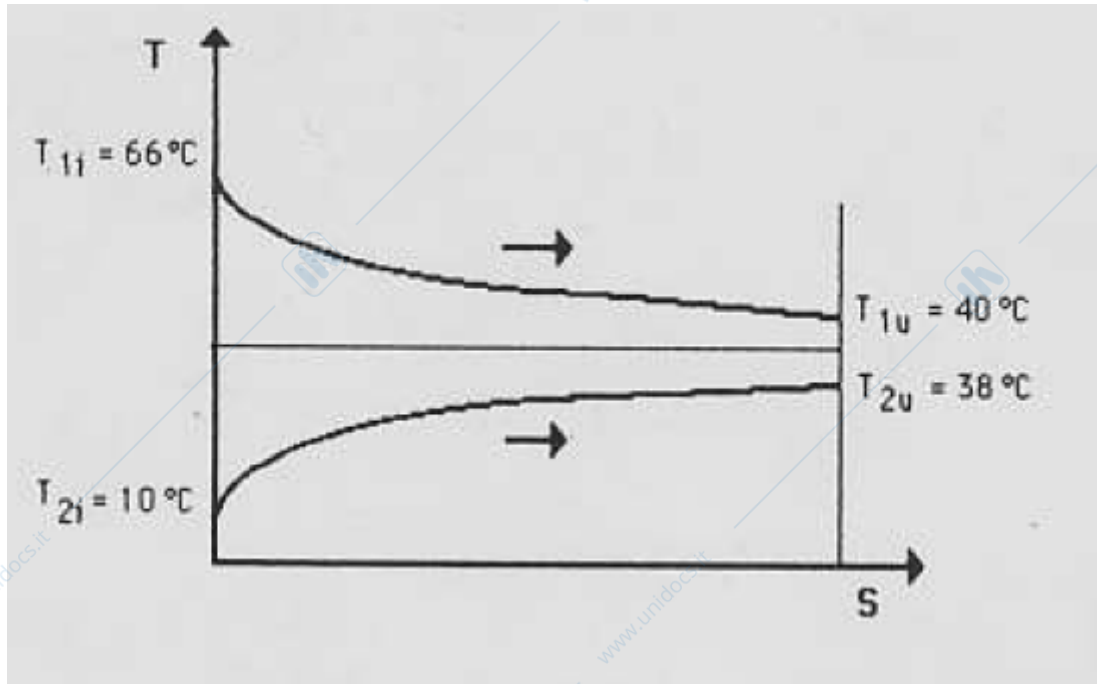
Caso a) Scambiatore in equicorrente pura

In questo caso entrambi i fluidi entrano o escono dalla medesima estremità. Si ha, quindi

$$\Delta T_0 = T_{1i} - T_{2i} = 66 - 10 = 56^\circ\text{C}$$



Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti



$$\Delta T_s = T_{1u} - T_{2u} = 40 - 38 = 2^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_s}{\ln(\Delta T_0/\Delta T_s)} = \frac{56 - 2}{\ln(56/2)} = 16.2^\circ\text{C}$$

Nota la potenza scambiata Q , si può, quindi, ricavare la superficie di scambio termico:

$$S = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_m} = \frac{715000 \text{ W}}{581 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} \cdot 16.2^\circ\text{C}} = 76 \text{ m}^2$$

In questo caso, con un diametro di 25 mm, si avrebbe, ovviamente una lunghezza dello scambiatore troppo grande per essere realizzabile e lo scambiatore dovrà, pertanto, essere costituito da un fascio di tubi.

Infatti, nel caso di n tubi, si ha che la superficie è: $S = n \cdot \pi \cdot D \cdot L$ e per 100 tubi si ricava una lunghezza di 7.6 m che può essere accettabile.

Caso b) Scambiatore in controcorrente pura

In questo caso, a seconda che la sezione convenzionale di ingresso dello scambiatore coincida con la sezione di ingresso del fluido caldo o del fluido freddo, si ha:

$$\Delta T_0 = T_{1i} - T_{2u} = 66 - 38 = 28^\circ\text{C} \text{ oppure}$$

$$\Delta T_s = T_{1u} - T_{2i} = 40 - 10 = 30^\circ\text{C}$$

Ovviamente

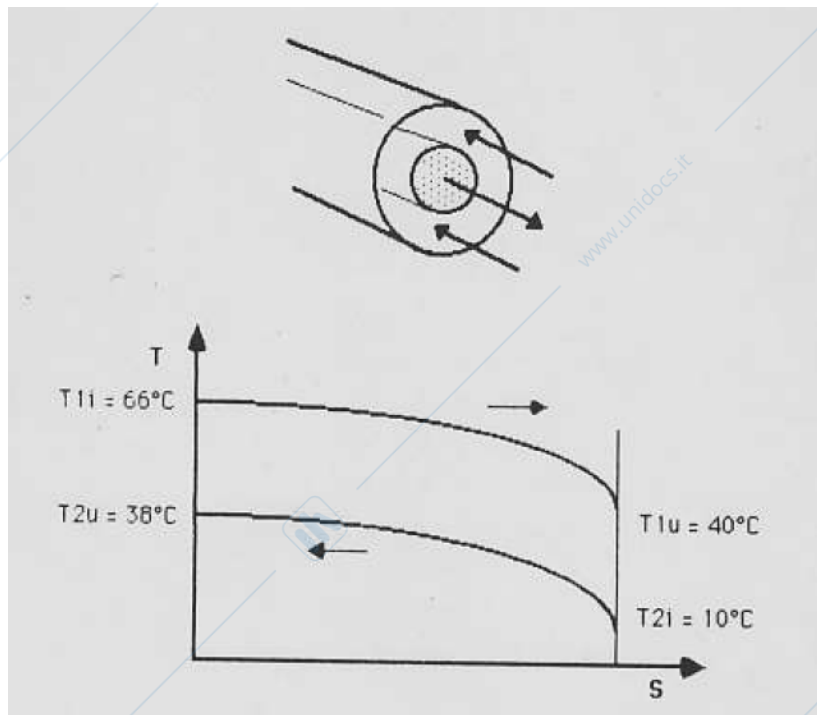
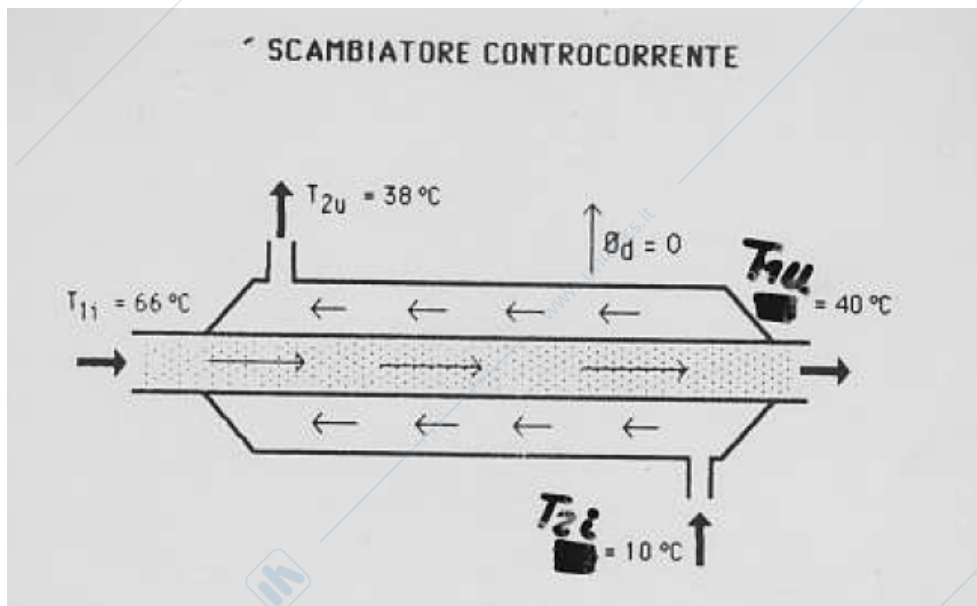
Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

$$\Delta T_0 = T_{1u} - T_{2i} = 40 - 10 = 30^\circ\text{C} \text{ oppure}$$

$$\Delta T_s = T_{1i} - T_{2u} = 66 - 38 = 28^\circ\text{C}$$

E il ΔT_m mantiene, evidentemente, sempre lo stesso valore:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_s}{\ln(\Delta T_0/\Delta T_s)} = \frac{28 - 30}{\ln(28/30)} = \frac{-2}{-0.069} = 29^\circ\text{C}$$



Oppure

$$\Delta T_m = \frac{30 - 28}{\ln(30/28)} = \frac{2}{0.069} = 29^\circ\text{C}$$

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

L'area della superficie di scambio termico si determina in base all'espressione:

$$S = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_m} = \frac{715000 \text{ W}}{581 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 29^\circ\text{C}} = 42.4 \text{ m}^2$$

Nel caso di scambiatore controcorrente, l'area della superficie di scambio termico risulta inferiore (in questo caso del 45% circa), a parità di flusso termico, di quella relativa allo scambiatore equicorrente. Anche in questo caso, la lunghezza dello scambiatore rimane comunque troppo elevata e occorrerà, pertanto, realizzare lo scambiatore con un fascio tubiero.

Efficienza degli scambiatori

Per definire l'efficienza di uno scambiatore risulta dal rapporto tra la potenza termica scambiata attraverso la superficie effettiva S e la potenza termica scambiabile per S tendente all'infinito:

$$e = \frac{Q}{Q_{S \rightarrow \infty}}$$

Caso a) Scambiatore in equicorrente pura

Nel caso dello scambiatore in equicorrente si ha:

$$Q_{S \rightarrow \infty} = m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1i} - T_{S \rightarrow \infty}) = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{S \rightarrow \infty} - T_{2i})$$

Da cui

$$T_{S \rightarrow \infty} = \frac{m_1 \cdot c_{p1} \cdot T_{1i} + m_2 \cdot c_{p2} \cdot T_{2i}}{m_1 \cdot c_{p1} + m_2 \cdot c_{p2}}$$

E applicando la definizione, e risulta

$$e = \frac{Q}{Q_{S \rightarrow \infty}} = e = \frac{Q}{c_{p2} \cdot (T_{S \rightarrow \infty} - T_{2i})}$$

Quindi:

$$T_{S \rightarrow \infty} = 39^\circ\text{C}$$

Da cui $e = 0.96$

Caso b) Scambiatore in controcorrente pura

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

In questo caso, il flusso termico scambiabile per S tendente all'infinito equivale a (vedi figura):

Situazione 1: per $m_1 \cdot c_{p1} < m_2 \cdot c_{p2}$

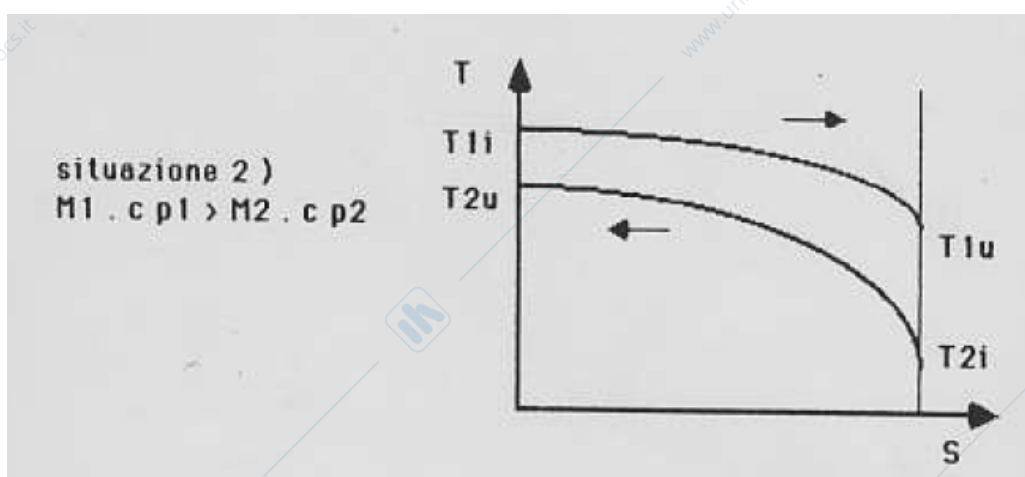
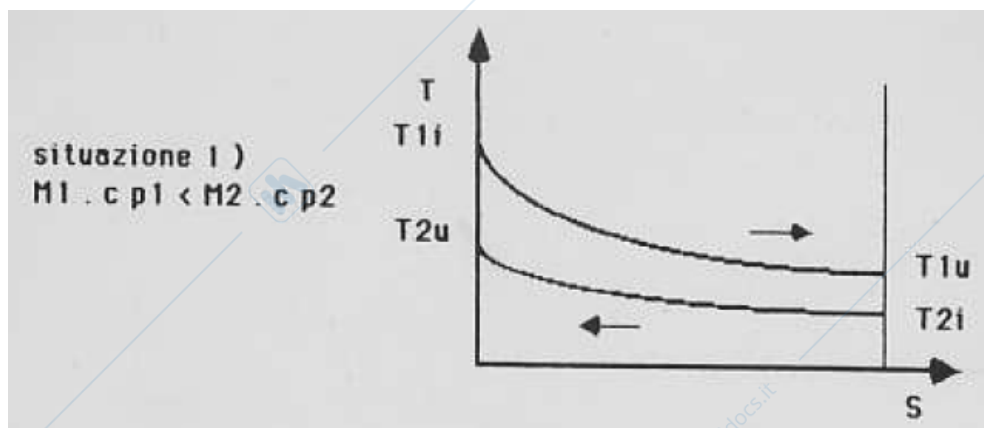
$$Q_{S \rightarrow \infty} = -m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{2i} - T_{1i})$$

Situazione 2: per $m_1 \cdot c_{p1} > m_2 \cdot c_{p2}$

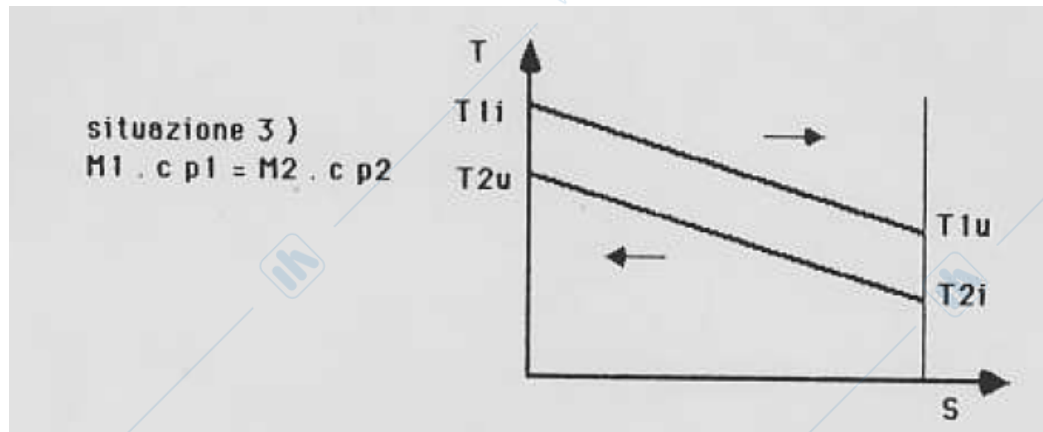
$$Q_{S \rightarrow \infty} = -m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{2i} - T_{1i})$$

Situazione 3: per $m_1 \cdot c_{p1} = m_2 \cdot c_{p2}$

È indifferente scegliere l'espressione relativa al caso 1 oppure al caso 2



Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti



Nel caso in esame, che corrisponde alla situazione 2, si ha pertanto:

$$e = \frac{Q}{m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{1i} - T_{2i})} = 0.5$$

Si noti la differenza nell'efficienza nei due casi, dovuta al fatto che, nello scambiatore equicorrente, anche aumentando di molto la superficie di scambio, il flusso aumenta solo di poco, essendo ormai ridotto il ΔT tra i due fluidi.

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

ESERCIZIO 2

Una portata di 3 l/h di olio leggero ($\rho = 900 \frac{kg}{m^3}$, $c_p = 2 \cdot 10^3 J/kg^\circ C$) deve essere raffreddata da 80°C a 25°. A tale scopo si vuole usare uno scambiatore di calore a correnti parallele; quale fluido freddo si dispone di acqua a 12°C ($\rho = 998.2 \frac{kg}{m^3}$).

Si valuti quale tipo di scambiatore (equicorrente, controcorrente), è possibile utilizzare, nel caso che la portata di acqua sia: a) 8.51 l/h; b) 3 l/h; c) 1.31 l/h; d) 1 l/h.

E si valuti, corrispondentemente, la superficie di scambio nell'ipotesi che il coefficiente di scambio termico globale di trasmissione del calore, K, valga in ogni caso 116 W/(m²°C).

SOLUZIONE

Supponendo le dispersioni nulle, si può scrivere:

$$Q = m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1i} - T_{1u}) = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{2u} - T_{2i})$$

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T_m$$

Si determina, prima di tutto, la portata in massa dei fluidi, moltiplicando la portata in volume per la corrispondente massa volumica:

$$m_1 = v \cdot \rho = 3 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h} \cdot 900 \frac{kg}{m^3} = 2.7 \frac{kg}{h} = 7.5 \cdot 10^{-4} kg/s$$

Per quanto riguarda l'acqua, la portata in massa nei quattro casi:

$$m_{2a} = 8.5 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h} \cdot 998.2 \frac{kg}{m^3} = 8.48 \frac{kg}{h} = 23.6 \cdot 10^{-4} kg/s$$

$$m_{2b} = 3 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h} \cdot 998.2 \frac{kg}{m^3} = 2.99 \frac{kg}{h} = 8.3 \cdot 10^{-4} kg/s$$

$$m_{2c} = 1.3 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h} \cdot 998.2 \frac{kg}{m^3} = 1.3 \frac{kg}{h} = 3.6 \cdot 10^{-4} kg/s$$

$$m_{2d} = 1 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h} \cdot 998.2 \frac{kg}{m^3} = 1 \frac{kg}{h} = 2.8 \cdot 10^{-4} kg/s$$

E', pertanto, possibile calcolare la quantità di calore che deve essere sottratta per unità di tempo nello scambiatore dell'acqua fredda e le temperature di uscita dell'acqua stessa.

Per raffreddare l'olio, lo scambiatore deve cedere all'acqua la seguente potenza termica:

$$Q = m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1i} - T_{1u}) = 7.5 \cdot 10^{-4} \cdot 2000 \frac{J}{kg^\circ C} \cdot (80 - 25)^\circ C = 82.5 W$$

Note le portate dell'acqua, con la medesima espressione si possono calcolare le temperature di uscita dell'acqua, e cioè:

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

$$T_{2u} = T_{2i} + \frac{Q}{m_2 \cdot c_{p2}}$$

$$T_{2ua} = 12 + \frac{82.5}{23.6 \cdot 10^{-4} \cdot 4.186} = 20^\circ\text{C}$$

$$T_{2ub} = 12 + \frac{82.5}{8.3 \cdot 10^{-4} \cdot 4.186} = 36^\circ\text{C}$$

$$T_{2uc} = 12 + \frac{82.5}{3.6 \cdot 10^{-4} \cdot 4.186} = 67^\circ\text{C}$$

$$T_{2ud} = 12 + \frac{82.5}{2.8 \cdot 10^{-4} \cdot 4.186} = 81^\circ\text{C}$$

Analizzando le temperature di entrata e di uscita dei fluidi, si può notare che:

Caso a)

La temperatura di uscita dell'acqua risulta inferiore alla temperatura alla quale deve essere raffreddato l'olio e permette, pertanto l'utilizzo di entrambe le tipologie di scambiatori: equicorrente e controcorrente.

Caso b),c)

Dato che la temperatura di uscita dell'acqua è maggiore di quella di uscita dell'olio, si può utilizzare solamente uno scambiatore in controcorrente.

Caso d)

Poiché la temperatura di uscita dell'acqua è maggiore di quella dell'olio all'ingresso, questo significa che la portata di acqua è, in questo caso, insufficiente, e non è, pertanto, possibile in funzionamento dello scambiatore.

Escludendo il caso d, è, quindi, possibile calcolare le superfici di scambio termico nei diversi casi utilizzando l'espressione:

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T_m \text{ da cui } S = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_m} \text{ dove } \Delta T_m = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_s}{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_s}\right)}$$

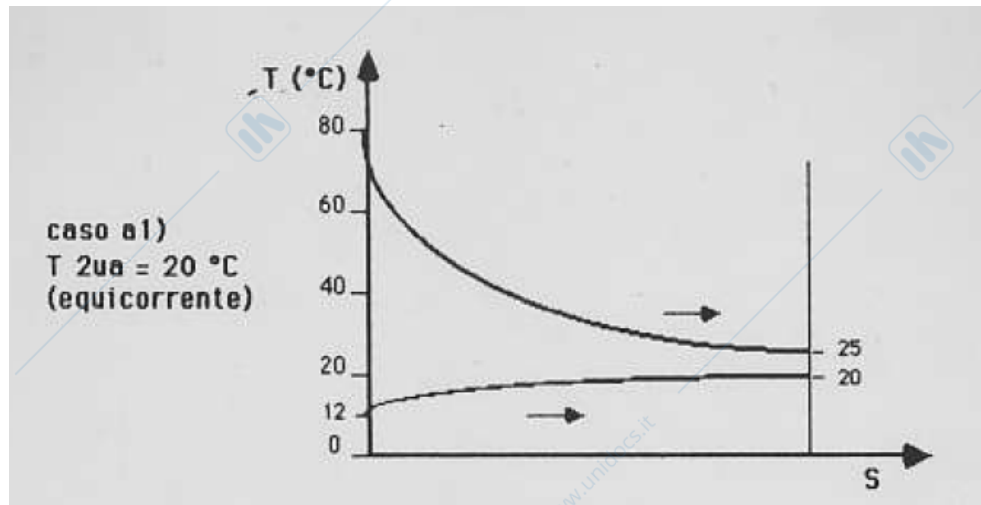
Caso a1) Scambiatore in equicorrente

$$\Delta T_m = \frac{68 - 5}{\ln\left(\frac{68}{5}\right)} = 24^\circ\text{C}$$

La superficie dello scambiatore risulta, pertanto:

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

$$S = \frac{82.5 \text{ W}}{116 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} \cdot 24^\circ\text{C}} = 0.03\text{m}^2$$

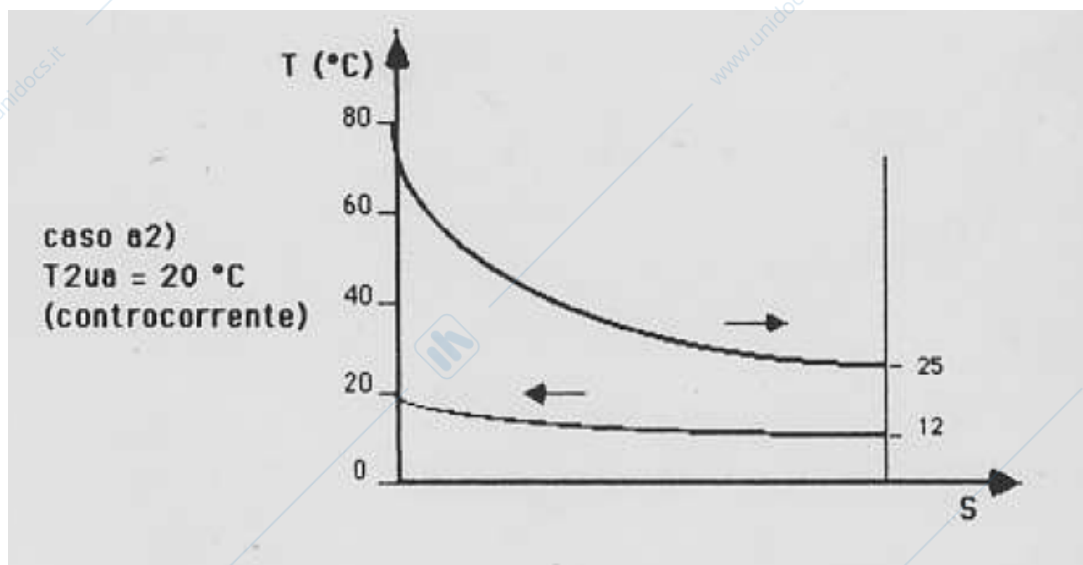


Caso a2) Scambiatore in controcorrente

$$\Delta T_m = \frac{60 - 13}{\ln\left(\frac{60}{13}\right)} = 31^\circ\text{C}$$

La superficie dello scambiatore risulta, pertanto:

$$S = \frac{82.5 \text{ W}}{116 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} \cdot 31^\circ\text{C}} = 0.023\text{m}^2$$



Si può notare, anche in questo caso, come, a parità di flusso, lo scambiatore in controcorrente richieda una minore superficie di scambio termico (del 25% inferiore).

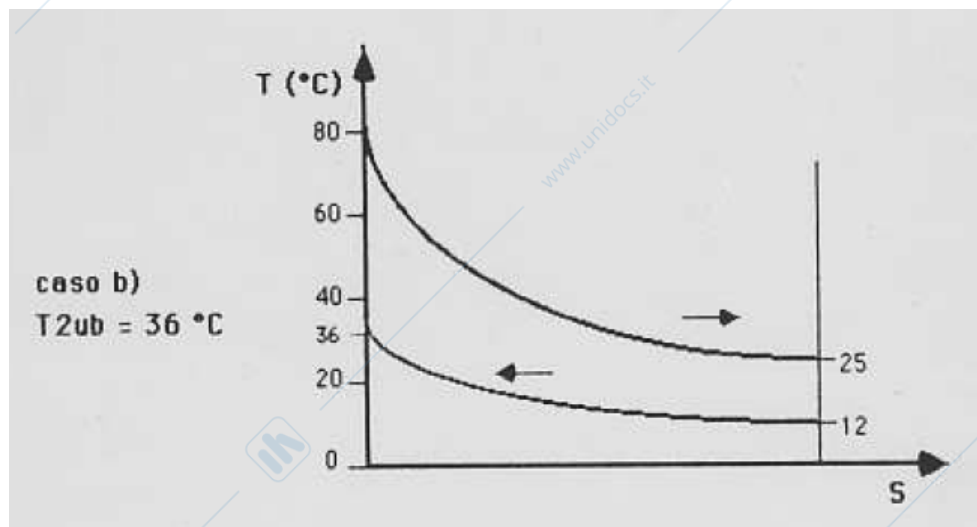
Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

Caso b) Scambiatore in controcorrente

$$\Delta T_m = \frac{44 - 13}{\ln\left(\frac{44}{13}\right)} = 25^\circ\text{C}$$

La superficie dello scambiatore risulta, pertanto:

$$S = \frac{82.5 \text{ W}}{116 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} \cdot 25^\circ\text{C}} = 0.028 \text{ m}^2$$

**Caso c) Scambiatore in controcorrente**

In questo caso, dato che:

$$m_1 c_{p1} = 7.5 \cdot 10^{-4} \cdot 2000 = 1.5 \text{ W}/^\circ\text{C}$$

e

$$m_2 c_{p2} = 3.6 \cdot 10^{-4} \cdot 4186 = 1.5 \text{ W}/^\circ\text{C}$$

Si ha $m_1 \cdot c_{p1} = m_2 \cdot c_{p2}$ e quindi:

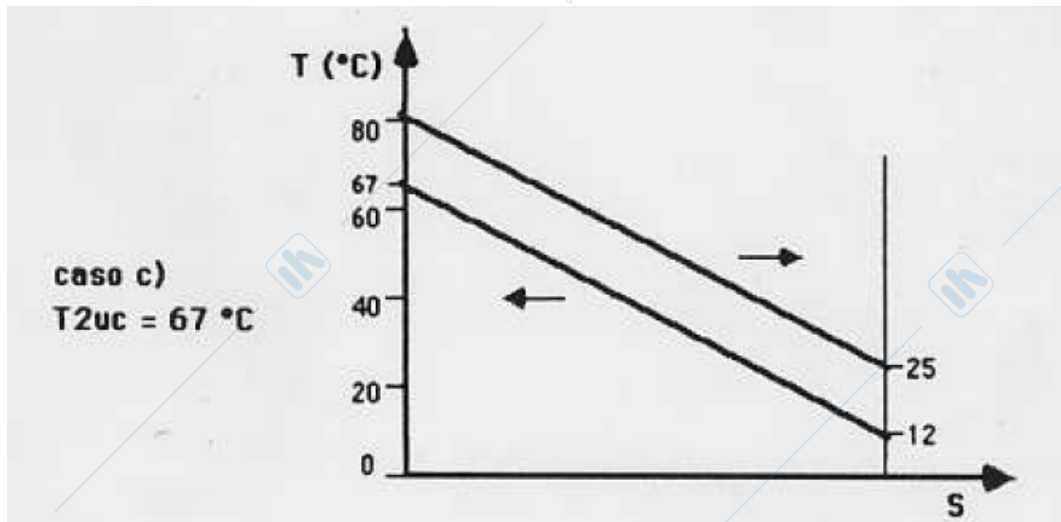
$$T_{1i} - T_{1u} = \Delta T_1 = T_{2u} - T_{2i} = \Delta T_2$$

e $\Delta T_0 = \Delta T_s$ infatti

$$\Delta T_0 = 80 - 67 = 13^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_s = 25 - 12 = 13^\circ\text{C}$$

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti



Il ΔT_m medio logaritmico risulta, in questo caso coincidente con $\Delta T_0 = \Delta T_s$

La superficie dello scambiatore risulta, pertanto:

$$S = \frac{82.5 \text{ W}}{116 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}} \cdot 13\text{°C}} = 0.055 \text{ m}^2$$

Confrontando i casi b) e c), si nota come – per uguale tipologia di scambiatore – dimezzando la portata dell'acqua (da 3 l/h a 1.3 l/h), si ha un raddoppio della superficie di scambio.

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

ESERCIZIO 3

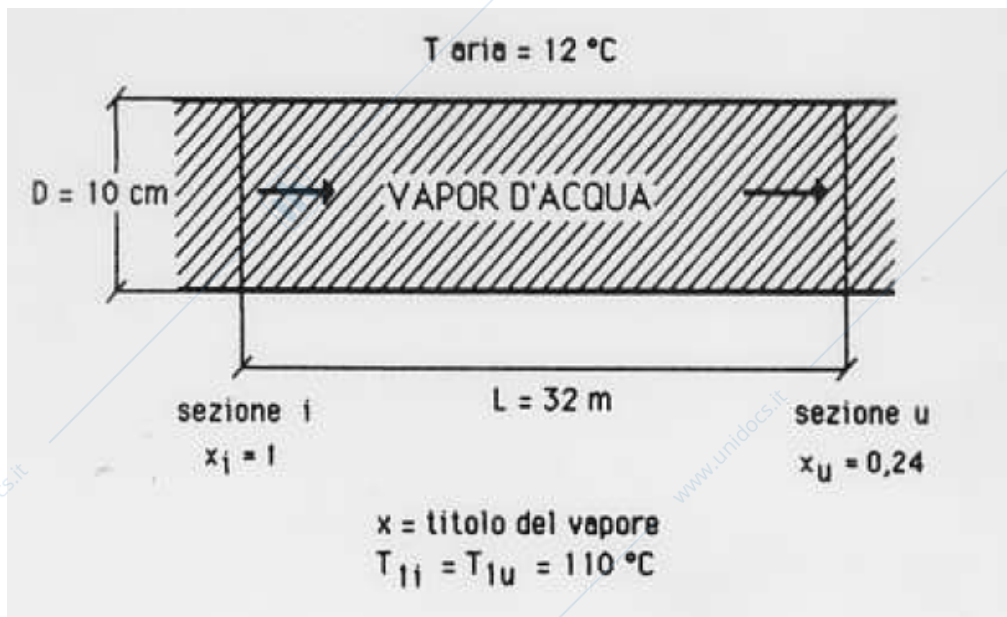
In un scambiatore di calore in controcorrente, si raffreddano 2.5 kg/s di olio ($c_p = 2.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^\circ\text{C}$) da 90 a 60°C con 1.25 kg/s di acqua a 16°C. Supponendo che il coefficiente globale di scambio, K, sia di 300 W/(m²°C), determinare la superficie necessaria e l'efficienza dello scambiatore.

$$[S=12 \text{ m}^2; e=0.4]$$

ESERCIZIO 4

In un tubo di rame, del diametro di 10 cm, fluisce del vapore d'acqua: nella sezione "i" si misurano una pressione di 0.14 MPa, una temperatura di 110°C ($\Delta H_{\text{vapore}}=2230 \text{ kJ/kg}$, $\rho_{\text{vapore}}=0.8263 \text{ kg/m}^3$), un titolo 1 e una velocità di 1 m/s; nella sezione "u" la pressione è praticamente immutata e il titolo è di 0.24. La distanza tra le due sezioni risulta di 32 m. Il tubo è sospeso in un ambiente in cui vi è aria alla temperatura di 12°C. Si determini, trascurando lo scambio termico per irraggiamento, il valore della conduttanza convettiva media all'esterno del tubo.

$$[h=11 \text{ W/(m}^2\text{°C)}]$$

**ESERCIZIO 5**

Una corrente d'aria [$c_p = 1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$] entra in uno scambiatore di calore a flussi incrociati a una temperatura di 12 °C e a una portata massica di 3 kg/s e vi viene riscaldata da una corrente d'acqua calda [$c_p = 4190 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$] che entra nello scambiatore di calore a una temperatura di 90 °C e a una portata massica di 1 kg/s. Si determinino (a) la potenza termica scambiata massima e (b) le temperature dei due fluidi all'uscita.

$$[Q_{\text{max}}=235.17 \text{ kW}; T_{f,u}=90^\circ\text{C}; T_{c,u}=33.9^\circ\text{C}]$$

Fisica Tecnica/Fisica tecnica e Impianti

ESERCIZIO 6

Si deve riscaldare acqua ($c_p = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$) con aria calda riscaldata con energia solare [$c_p = 1010 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] in uno scambiatore di calore a doppio tubo in controcorrente. L'aria entra nello scambiatore di calore a una temperatura di 90°C e a una portata massica di 0.3 kg/s e ne esce a una temperatura di 50°C . L'acqua entra nello scambiatore a una temperatura di 22°C e a una portata massica di 0.1 kg/s . Il coefficiente globale di scambio termico con riferimento al lato interno del tubo è pari a $80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Si determini la lunghezza del tubo necessaria per un diametro interno del tubo di 1.2 cm .

$$[L=97.3 \text{ m}]$$