

Capitolo 18

Scambiatori di calore

1

Obiettivi del capitolo

- Riconoscimento di diversi tipi di scambiatori di calore;
- Studio dei metodi utilizzati per il loro dimensionamento.

2

Sommario

- Caratteristiche generali
- Moto laminare sviluppato in condotti
- Caratteristiche del moto laminare
- Moto turbolento sviluppato in condotti
- Perdite di carico in condotti
- Esempi di calcolo
- Misure di portata

3

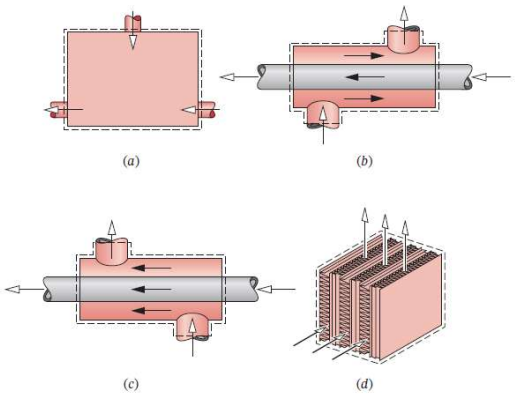
Definizione

Gli scambiatori di calore sono apparecchiature che facilitano lo scambio termico fra due fluidi a diversa temperatura.
In essi i due fluidi non possono miscelarsi tra di loro; il calore viene scambiato per convezione fra ciascuno dei due i fluidi e la parete che li separa, e per conduzione attraverso la predetta parete.

4

Conservazione dell'energia: analisi dei volumi di controllo in regime stazionario

Scambiatori di calore



Assunzioni:
Stazionario
Adiabatico
Lavoro nullo
Variazioni E_c ed E_p trascurabili

$$\dot{m}_A (h_u - h_i)_A = -\dot{m}_B (h_u - h_i)_B$$

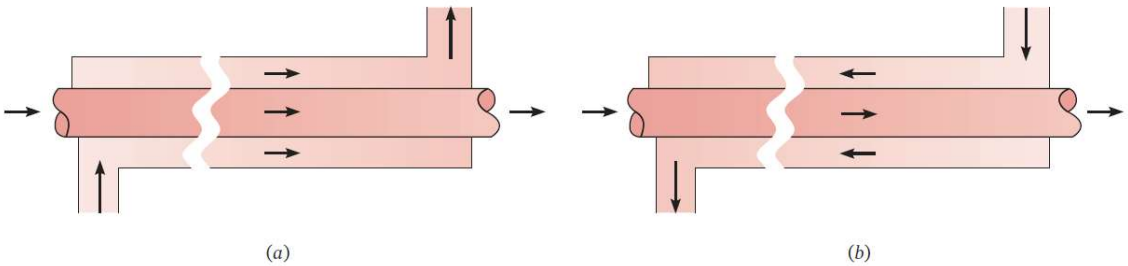
Fluido A Fluido B

5

Tipologie di scambiatori di calore - 1

Tubi concentrici

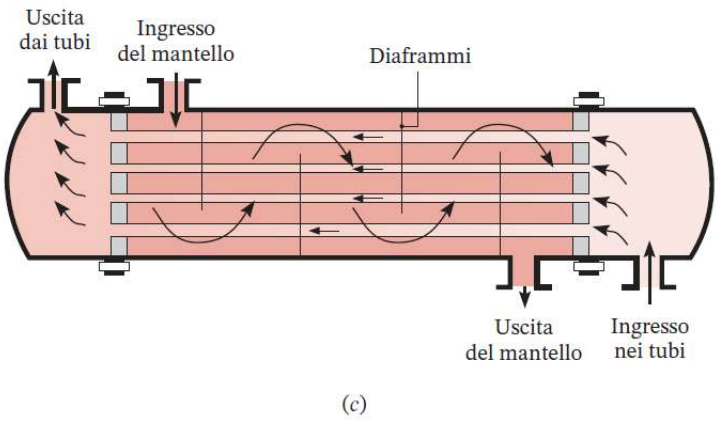
Lo scambiatore di calore più semplice è quello in cui il fluido caldo e quello freddo scorrono nella stessa direzione o in direzione opposta in tubi concentrici (o doppio tubo). Equicorrente (a), controcorrente (b).



6

Tipologie di scambiatori di calore - 2

Tubi e mantello



(c)

Una configurazione comune negli impianti di produzione dell'energia elettrica e nelle grosse applicazioni industriali è quella dello scambiatore di calore a tubi e mantello. In questo scambiatore, che è provvisto di un mantello attraversato da più tubi, la corrente attraversa una sola volta il mantello.

7

Tipologie di scambiatori di calore - 2

Tubi e mantello

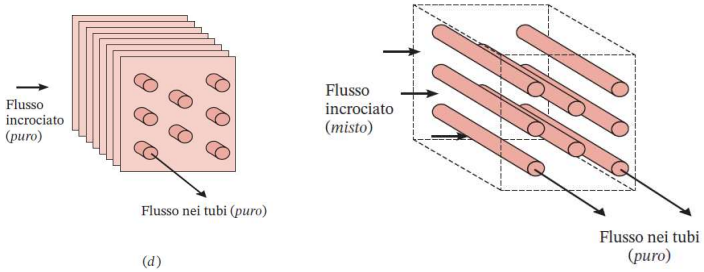


8

Tipologie di scambiatori di calore - 3

Correnti incrociate

Lo scambiatore di calore a correnti incrociate è costituito da un pacche di piastre sottili montate su una serie di tubi paralleli. Le piastre fungono da alette aumentando lo scambio termico convettivo; contemporaneamente esse assicurano lo scorrimento del fluido perpendicolare ai tubi.



9

Tipologie di scambiatori di calore - 3

Correnti incrociate

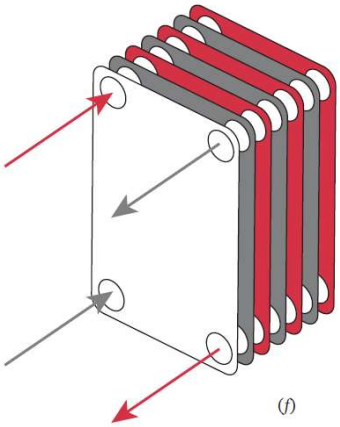




10

Tipologie di scambiatori di calore - 4

Scambiatore a piastre

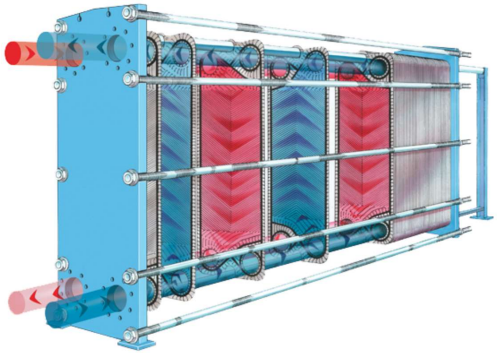


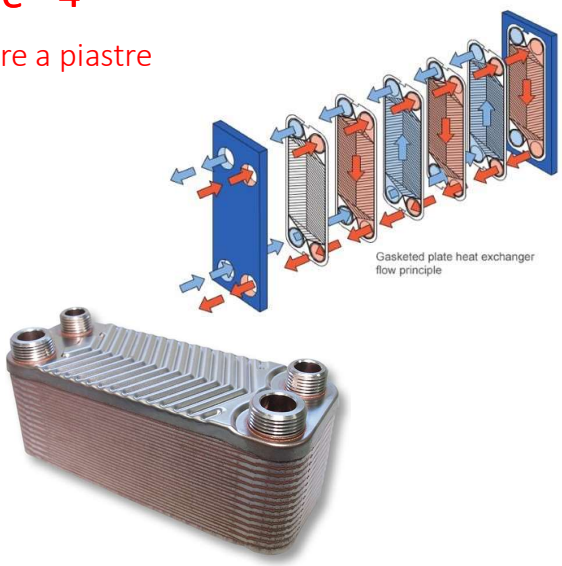
Un'altra configurazione innovativa, utilizzata per lo scambio termico di liquidi è costituita dallo scambiatore a piastre.
Esso è costituito da piastre corrugate che formano piccoli condotti per il passaggio dei fluidi; il fluido caldo e quello freddo fluiscono alternativamente fra due piastre, posizionando in maniera opportuna la guarnizione, in modo che la corrente fredda è a contatto con due correnti calde adiacenti, e viceversa.

11

Tipologie di scambiatori di calore - 4

Scambiatore a piastre



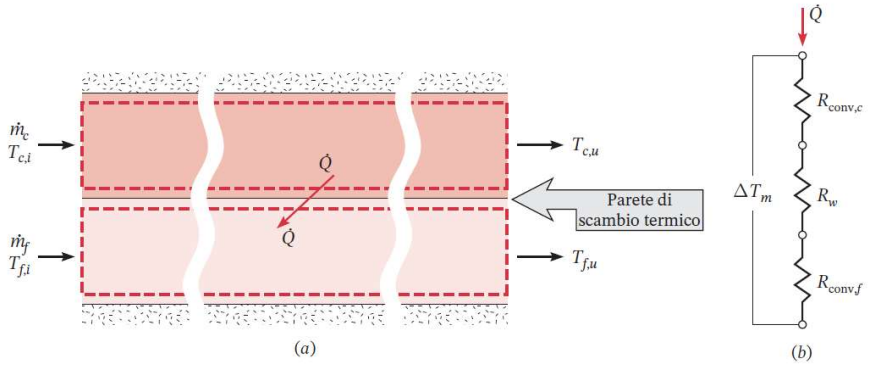


12

Analisi degli scambiatori di calore - 1

Bilanci energetici dei fluidi

Si consideri la rappresentazione dello scambiatore in figura.

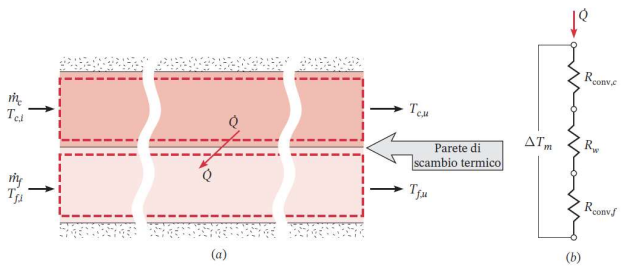


13

Analisi degli scambiatori di calore - 2

Bilanci energetici dei fluidi

Ipotizzando condizioni stazionarie, trascurando gli effetti dell'energia cinetica e potenziale, considerando il lavoro esterno nullo e condizioni adiabatiche ed assumendo i c_p dei fluidi costanti, il bilancio energetico per i due fluidi è il seguente:



$$-\dot{Q} = \dot{m}(h_{c,u} - h_{c,i})$$
$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{f,u} - h_{f,i})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{c,i} - T_{c,u})$$
$$\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,u} - T_{f,i})$$

14

Analisi degli scambiatori di calore - 3

Bilanci energetici dei fluidi

Il bilancio per i due fluidi può essere riscritto nella formula seguente:

$$\dot{Q} = C_c \cdot (T_{c,i} - T_{c,u}) \qquad \dot{Q} = C_f \cdot (T_{f,u} - T_{f,i})$$

$$\left.\begin{aligned} C_c &= \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \\ C_f &= \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \end{aligned}\right\} \rightarrow \text{capacità termiche istantanee [W/K]}(o\ portate\ capacitive)$$

Si noti che tali equazioni sono indipendenti dal tipo di flusso, dal tipo di scambiatore di calore e dalle dimensioni fisiche (aree delle superfici).

15

Analisi degli scambiatori di calore - 4

L'equazione della potenza termica

Si vuole cercare un'altra espressione per legare la potenza termica alla opportuna differenza di temperatura tra il fluido caldo e quello freddo dove $\Delta T = T_c - T_f$.

ΔT varia lungo lo scambiatore di calore: è necessario utilizzare una relazione del tipo:

$$\dot{Q} = \mathrm{U} \cdot \mathrm{A} \cdot \Delta \mathrm{T_m}$$

dove U è il coefficiente globale di scambio termico, ΔT_m è un'opportuna differenza media di temperatura e A è l'area della superficie di scambio termico dello scambiatore di calore.

Questa espressione dipende dalla configurazione dello scambiatore di calore, dalle condizioni del flusso e dalle dimensioni fisiche.

16

Analisi degli scambiatori di calore - 5

Il coefficiente globale

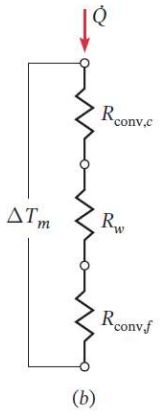
L'equazione della potenza termica può essere rappresentata attraverso il circuito termico in figura in funzione delle resistente termiche convettive lato fluido caldo freddo e della resistenza termica conduttiva delle pareti:

$$\frac{1}{U \cdot A} = R_{conv,c} + R_p + R_{conv,f} = \left(\frac{1}{h \cdot A}\right)_c + R_w + \left(\frac{1}{h \cdot A}\right)_f$$

Il calcolo del prodotto *UA* può basarsi sia sul lato caldo che sul lato freddo:

$$\frac{1}{\mathrm{U} \cdot \mathrm{A}} = \frac{1}{\mathrm{U_c} \cdot \mathrm{A_c}} = \frac{1}{\mathrm{U_f} \cdot \mathrm{A_f}}$$

I coefficienti convettivi per il lato caldo e per quello freddo possono essere stimati utilizzando le opportune correlazioni empiriche.



17

Analisi degli scambiatori di calore - 5

Il coefficiente globale – *cont.*

L'espressione vista del coefficiente globale vale, a rigore, per superfici pulite (scambiatore nuovo). Nel tempo si possono formare dei depositi a causa delle impurità contenute nei fluidi, o a causa dell'ossidazione (ruggine). Ciò può portare ad un significativo incremento della resistenza termica.

Si tiene conto di ciò attraverso un fattore di sporcamento (fouling factor) R_f''

$$\frac{1}{\mathrm{U} \cdot \mathrm{A}} = \left(\frac{1}{h \cdot A}\right)_c + \left(\frac{R_f''}{A}\right)_c + \left(\frac{R_f''}{A}\right)_f + R_w + \left(\frac{1}{h \cdot A}\right)_f$$

Representative Fouling Factors

Fluid	R_f'' (m² · K/W)
Seawater and treated boiler feedwater (below 50°C)	0.0001
Seawater and treated boiler feedwater (above 50°C)	0.0002
River water (below 50°C)	0.0002–0.001
Fuel oil	0.0009
Refrigerating liquids	0.0002
Steam (nonoil bearing)	0.0001

18

Analisi degli scambiatori di calore - 5

Il coefficiente globale – *cont.*

Valori tipici del coefficiente globale di scambio termico

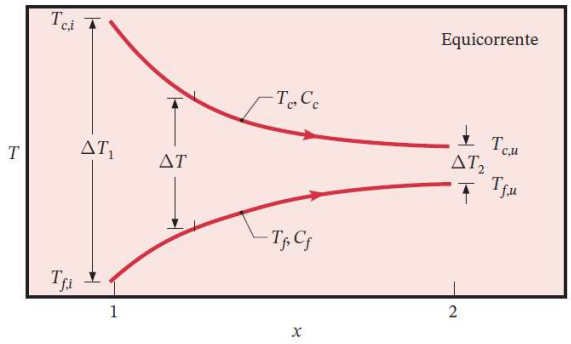
Representative Values of the Overall Heat Transfer Coefficient

Fluid Combination	U (W/m^2 · K)
Water to water	850–1700
Water to oil	110–350
Steam condenser (water in tubes)	1000–6000
Ammonia condenser (water in tubes)	800–1400
Alcohol condenser (water in tubes)	250–700
Finned-tube heat exchanger (water in tubes, air in cross flow)	25–50

19

Metodo LMTD - 1

Scambiatori di calore equicorrente



Le distribuzioni di temperatura del fluido caldo e freddo associate a scambiatori equicorrente sono rappresentate in figura dove i pedici 1 e 2 rappresentano le sezioni finali opposte dello scambiatore.

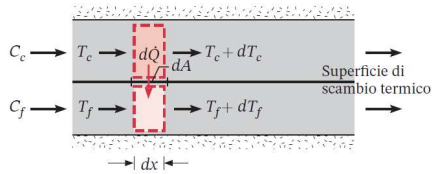
La differenza di temperatura ΔT è inizialmente elevata, ma al crescere di x diminuisce rapidamente, tendendo asintoticamente a zero.

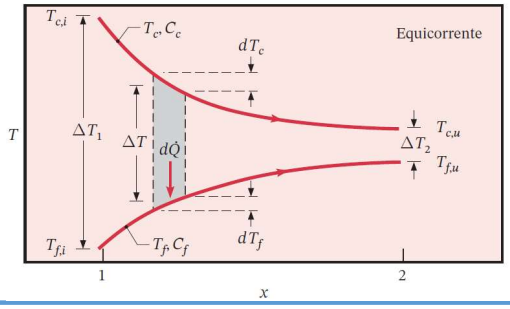
È importante notare che, per questi scambiatori di calore, la temperatura di uscita del fluido freddo non può mai essere superiore a quella fluido caldo.

20

Metodo LMTD - 2

Scambiatori di calore equicorrente – LMTD derivazione





La forma dell'opportuna differenza media di temperatura ΔTm, che verrà detta differenza media logaritmica di temperatura ΔTml, si ricava applicando un bilancio energetico ai volumi di controllo infinitesimi del fluido caldo e freddo.

Come mostrato in figura, ciascun elemento è di lunghezza dx e la superficie di scambio termico ha area dA. Ne consegue:

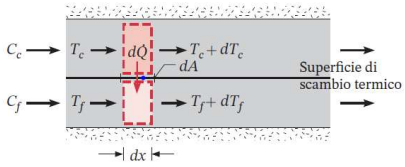
$$d\dot{Q} = -C_c \cdot dT_c \rightarrow \text{per il fluido caldo}$$
$$d\dot{Q} = C_f \cdot dT_f \rightarrow \text{per il fluido freddo}$$

21

Metodo LMTD - 3

Scambiatori di calore equicorrente – LMTD derivazione

$$d\dot{Q} = U \cdot \Delta T \cdot dA$$
$$\Delta T = T_c - T_f \;\Rightarrow\; d(\Delta T) = dT_c - dT_f$$
$$\left.\begin{aligned} dT_c &= -\frac{dq}{C_c} \\ dT_f &= \frac{dq}{C_f} \end{aligned}\right\} \;\Rightarrow\; d(\Delta T) = -d\dot{Q} \cdot \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_f}\right)$$



$$d\dot{Q} = U \cdot \Delta T \cdot dA \;\Rightarrow\; d(\Delta T) = -U \cdot \Delta T \cdot dA \cdot \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_f}\right)$$
$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \cdot dA \cdot \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_f}\right) \;\rightarrow\; \int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \cdot \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_f}\right) \cdot \int_1^2 dA$$

22

Metodo LMTD - 4

Scambiatori di calore equicorrente – LMTD derivazione

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -U \cdot A \cdot \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_f}\right)$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{C_c} &= \frac{(T_{c,i} - T_{c,u})}{\dot{Q}} \\ \frac{1}{C_f} &= \frac{(T_{f,u} - T_{f,i})}{\dot{Q}} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -U \cdot A \cdot \left[\frac{(T_{c,i} - T_{c,u})}{\dot{Q}} + \frac{(T_{f,u} - T_{f,i})}{\dot{Q}}\right]$$

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -\frac{U \cdot A}{\dot{Q}} \cdot \left[(T_{c,i} - T_{f,i}) - (T_{c,u} - T_{f,u})\right] = -\frac{U \cdot A}{\dot{Q}} \cdot (\Delta T_1 - \Delta T_2)$$

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \Rightarrow \Delta T_m = \boxed{\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}}$$

23

Metodo LMTD - 5

Scambiatori di calore equicorrente – LMTD derivazione

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m$$

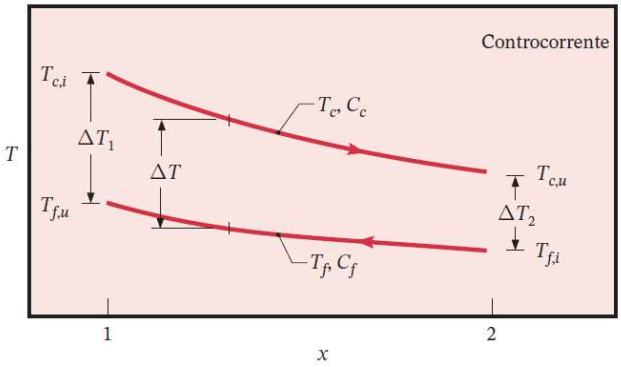
$$\Delta T_m = \Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \equiv \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$\left.\begin{aligned} \Delta T_1 &= T_{c,i} - T_{f,i} \\ \Delta T_2 &= T_{c,u} - T_{f,u} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \text{scambiatore equicorrente}$$

24

Metodo LMTD - 6

Scambiatori di calore controcorrente



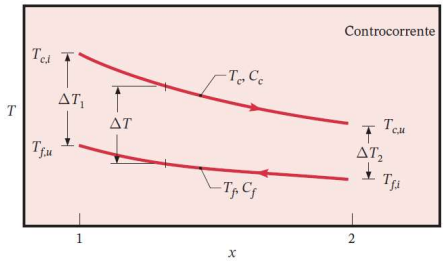
Le distribuzioni di temperatura associate ad uno scambiatore controcorrente sono illustrate in figura. Questa configurazione fa sì che lo scambio avvenga tra le sezioni più calde dei due fluidi da un lato e tra quelle più fredde dall'altro.

La variazione della differenza di temperatura $\Delta T \equiv T_c - T_f$ rispetto ad x è la massima possibile dalla sezione d'ingresso a quella d'uscita e la temperatura d'uscita del fluido freddo può essere superiore a quella d'uscita del fluido caldo.

25

Metodo LMTD - 7

Scambiatori di calore controcorrente - LMTD



La potenza termica e la *LMTD* sono espresse come:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m$$

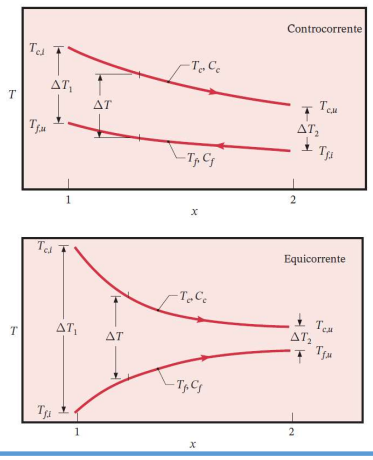
$$\Delta T_m \equiv \Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta T_1 &= T_{c,i} - T_{f,u} \\ \Delta T_2 &= T_{c,u} - T_{f,i}\end{aligned}\right\} \Rightarrow \text{scambiatore controcorrente}$$

26

Metodo LMTD - 8

Scambiatori di calore controcorrente VS equicorrente



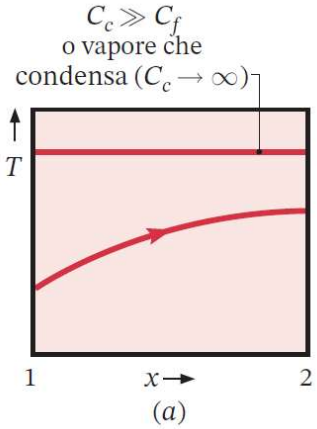
Date le *stesse* temperature di ingresso e di uscita:

- La LMTD dello scambiatore controcorrente è superiore rispetto a quella dello scambiatore equicorrente, $\Delta T_{ml,EC} < \Delta T_{ml,CC}$
- La superficie necessaria per ottenere lo scambio termico corrispondente ad una data potenza termica $\dot{Q}$ di uno scambiatore di calore controcorrente è inferiore a quella di una scambiatore di calore equicorrente, per lo stesso valore di U.
- Si osservi inoltre che $T_{f,u}$ può essere superiore a $T_{c,u}$ nello scambiatore di calore controcorrente ma non in quello equicorrente.

27

Condizioni particolari di funzionamento - 1

$C_c >> C_f$

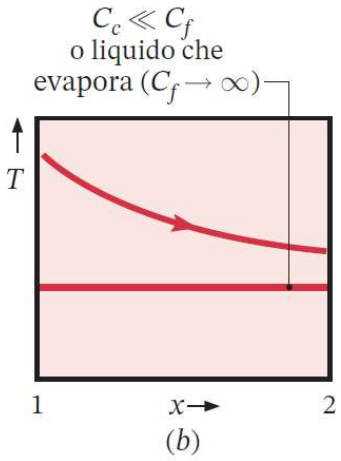


In questo caso la capacità termica istantanea del fluido caldo è molto maggiore di quella del fluido freddo.

28

Condizioni particolari di funzionamento - 2

$C_c << C_f$

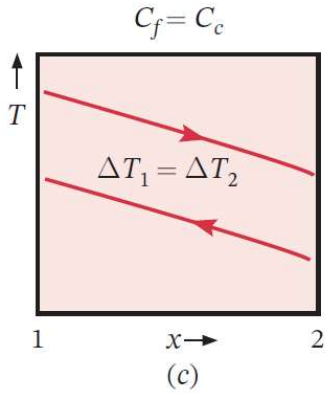


In questo caso la temperatura del fluido freddo rimane pressoché uniforme lungo lo scambiatore di calore mentre la temperatura del fluido caldo diminuisce . Nei casi di evaporazione e condensazione, i bilanci energetici per i fluidi che evaporano o condensano devono essere scritti in termini di entalpie di cambiamento di fase.

29

Condizioni particolari di funzionamento - 3

$C_c = C_f$



Il terzo caso rappresenta uno scambiatore controcorrente in cui le capacità termiche istantanee dei due fluidi sono uguali.

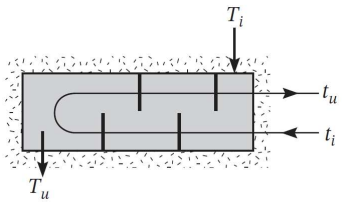
30

LMTD per altre tipologie di scambiatori - 1

Scambiatori a tubi e mantello

Nella figura sottostante viene mostrata la condizione di flusso all'interno di scambiatori di calore a tubi e a mantello, più complicata rispetto a quella degli scambiatori di calore a tubi concentrici.

In tal caso occorre inserire un fattore correttivo *F* all'espressione della *LMTD* calcolata come se lo scambiatore fosse controcorrente:

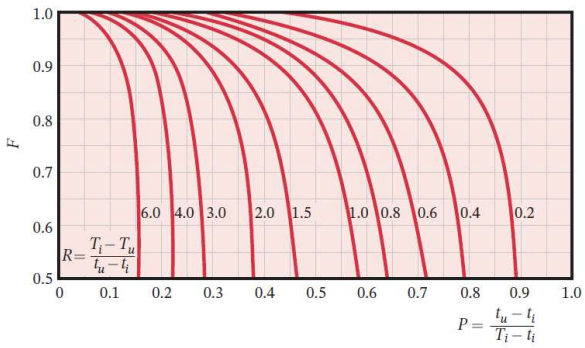


$$\Delta T_{ml} = F \cdot \Delta T_{ml,cc}$$

31

LMTD per altre tipologie di scambiatori - 2

Scambiatori a tubi e mantello



Se la variazione di temperatura di un fluido è trascurabile e sia P sia R sono zero e F = 1, il comportamento dello scambiatore di calore è indipendente dalla configurazione. È questo il caso che si riscontra quando uno dei due fluidi subisce un cambiamento di fase.

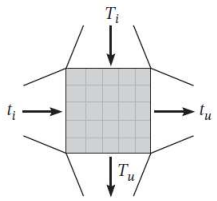
32

LMTD per altre tipologie di scambiatori - 3

Scambiatori a correnti incrociate

Nella figura sottostante viene mostrata la condizione di flusso all'interno di scambiatori di calore a correnti incrociate.

Anche in questo caso occorre inserire un fattore correttivo *F* all'espressione della *LMTD* calcolata come se lo scambiatore fosse controcorrente:

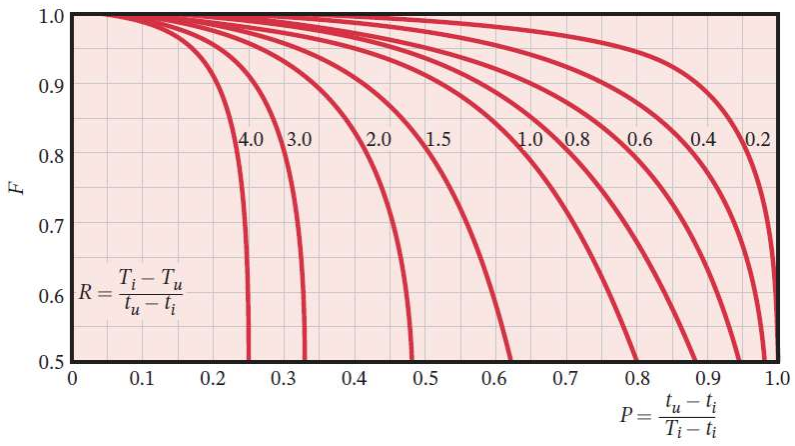


$$\Delta T_{ml} = F \cdot \Delta T_{ml,cc}$$

33

LMTD per altre tipologie di scambiatori - 4

Scambiatori a correnti incrociate



34

Metodo *ε-NTU* - 1

Differenze con metodo LMTD

IL metodo *LMTD* risulta particolarmente utile qualora si ponga il problema di dimensionare uno scambiatore di calore (ossia, di scegliere uno scambiatore in base al valore del prodotto UA che lo caratterizza) e si conoscano a priori (o siano ricavabili dai bilanci di potenza) le temperature di ingresso e di uscita di entrambi i fluidi.
In caso contrario, non risulta errato far ricorso al metodo *LTMD*, ma la determinazione del prodotto *UA* puo essere condotta unicamente tramite procedure iterative, risultando oltremodo laboriosa.

Si può allora utilizzare il metodo ε-NTU.

35

Metodo *ε-NTU* - 2

Definizioni

Si basa sulla definizione di un parametro, detto efficacia dello scambiatore di calore:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}}$$

$\dot{Q}_{max}$ indica la massima potenza termica teoricamente scambiabile nello scambiatore di calore:

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot \Delta T_{max} = min(C_c, C_f) \cdot (T_{c,i} - T_{f,i})$$

36

Metodo ε-NTU - 3

Calcolo di ε con metodo analitico

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{min(C_c, C_f)}{max(C_c, C_f)}$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$ Number of Thermal Units

Scambiatore doppio tubo equicorrente:

$$\varepsilon = \frac{1-e^{-NTU(1+C_r)}}{1+C_r} \rightarrow \dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{max} \rightarrow$$ temperature finali dei fluidi

Scambiatore doppio tubo controcorrente:

$$\varepsilon = \frac{1-e^{-NTU(1-C_r)}}{1-C_r e^{-NTU(1-C_r)}} \rightarrow \dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{max} \rightarrow$$ temperature finali dei fluidi

37

Metodo ε-NTU - 4

Calcolo di ε con metodo analitico

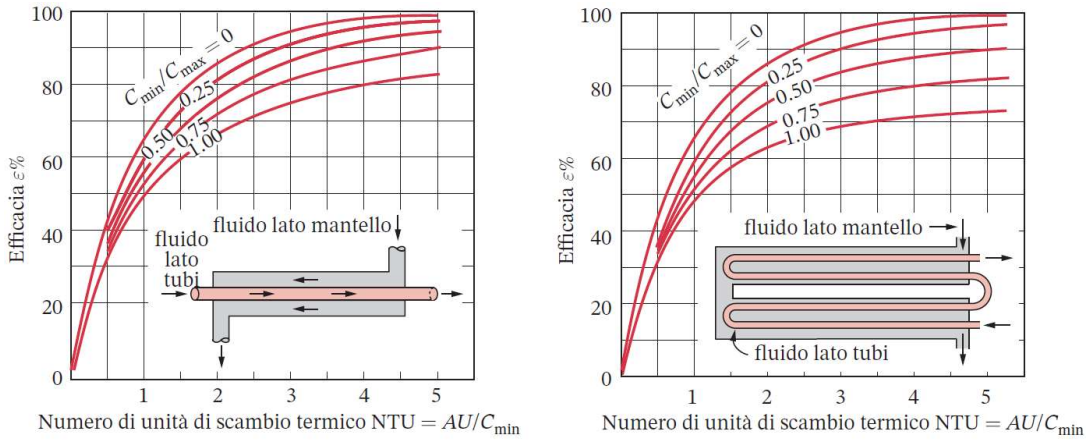
Tabella 18.1 Correlazione per la valutazione dell'efficacia per alcuni tipi di scambiatori di calore

Tipologia	Tipo	Correlazione
Tubi concentrici	Equicorrente	$\varepsilon = \frac{1-\exp(-\text{NTU}[1+C_r])}{1+C_r}$
Tubi concentrici	Controcorrente	$\varepsilon = \frac{1-\exp(-\text{NTU}[1-C_r])}{1-C_r\exp(-\text{NTU}[1-C_r])}$
Tubi e mantello	Un passaggio nel mantello e 2, 4, 6, ... nei tubi	$\varepsilon = 2\left\{1+C_r+\sqrt{1+C_r^2}\,\frac{1+\exp\left(-\text{NTU}\sqrt{1+C_r^2}\right)}{1-C_r\exp\left(-\text{NTU}\sqrt{1+C_r^2}\right)}\right\}$
Flussi incrociati	Puri	$\varepsilon = 1-\exp\left\{-\frac{\text{NTU}^{0,22}}{C_r}\left[1-\exp\left(-\text{NTU}^{0,78}\,C_r\right)\right]\right\}$
Flussi incrociati	C_{max} misto, C_{min} puro	$\varepsilon = \frac{1}{C_r}\left(1-\exp\left\{-C_r\left[1-\exp(-\text{NTU})\right]\right\}\right)$
Flussi incrociati	C_{max} puro, C_{min} misto	$\varepsilon = 1-\exp\left\{-\frac{1}{C_r}\left[1-\exp(-\text{NTU}\,C_r)\right]\right\}$
Qualunque con cambiamento di fase (condensatore o evaporatore)	$C_{max} = \infty \Rightarrow C_r = 0$	$\varepsilon = 1-\exp(-\text{NTU})$

38

Metodo *ε-NTU* - 5

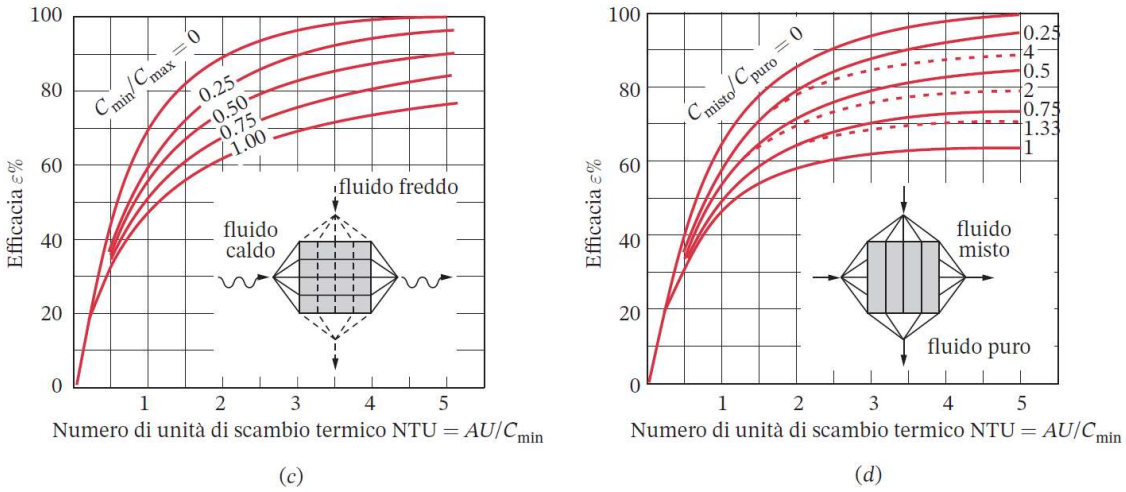
Calcolo di ε con metodo grafico



39

Metodo *ε-NTU* - 6

Calcolo di ε con metodo grafico



40