

EVAPORAZIONE 1

1. Una soluzione acquosa al 10% con una portata di 400 kg/min preriscaldata a 50°C viene concentrata al 25% mediante un evaporatore operante alla pressione di 0,54 ata. Tenendo presente che:

- a) come fluido di riscaldamento si utilizza vapore di rete saturo secco a 2,5 ata alla temperatura di 126,2°C, con una entalpia specifica $h_w = 648$ kcal/kg e un calore latente di condensazione $\lambda_w = 521,4$ kcal/kg
- b) il vapore svolto nell'effetto a 0,54 ata ha una temperatura $T_v = 82,7^\circ\text{C}$, una entalpia specifica $h_v = 632,3$ kcal/kg e un calore latente di condensazione $\lambda_v = 549,7$ kcal/kg. Tale vapore viene abbattuto totalmente in un condensatore barometrico alimentato con acqua di raffreddamento disponibile alla temperatura $T_A = 18^\circ\text{C}$, mentre la miscela acqua-vapore condensato esce alla temperatura di condensazione del vapore
- c) sono trascurabili le perdite di calore dell'impianto
- d) si possono considerare unitari ed uguali a quelli dell'acqua pura i calori specifici C_p delle soluzioni
- e) sono trascurabili gli effetti ebullioscopici

determinare:

- 1) il consumo orario di vapore di rete
- 2) la portata oraria di acqua di raffreddamento al condensatore barometrico
- 3) la superficie di scambio termico dell'evaporatore, assumendo un coefficiente globale di scambio termico $U_D = 1800$ kcal/m²·h·°C

2. In un impianto di evaporazione a singolo effetto una soluzione acquosa di un prodotto organico viene concentrata dal 8% al 16% in massa. L'impianto deve produrre 30 t/giorno di soluzione concentrata. L'evaporatore viene riscaldato mediante vapore di rete saturo secco a 3,5 ata, opera alla pressione di esercizio di 0,4 ata ed ha un coefficiente globale di scambio termico pari a 1400 W/m²·°C. Sono noti i seguenti dati di progetto per il vapore W di riscaldamento e il vapore V svolto:

- vapore W (3,5 ata): $T_w = 138^\circ\text{C}$, $h_w = 2733$ kJ/kg, $\lambda_w = 2156$ kJ/kg
- vapore V (0,4 ata): $T_v = 75^\circ\text{C}$, $h_v = 2634$ kJ/kg, $\lambda_v = 2318$ kJ/kg

La soluzione al 8% è disponibile alla temperatura di 60°C. Il vapore svolto viene abbattuto in un condensatore barometrico, alimentato con acqua industriale di raffreddamento a 18°C, dal quale la miscela condensata esce alla temperatura massima di 50°C.

Tenendo presente che:

- le soluzioni hanno un calore specifico che si può considerare coincidente con quello dell'acqua pura (4,18 kJ/Kg·°C)
- sono trascurabili le perdite di calore e l'effetto ebullioscopico

determinare:

- 1) il consumo orario di vapore di rete
- 2) l'area di scambio termico dell'evaporatore
- 3) il consumo orario di acqua di raffreddamento al condensatore barometrico

3. Un impianto di evaporazione a singolo effetto deve trattare 800 kg/h di una soluzione di un composto organico concentrandola dal 5% al 20% in massa. Il solvente è diverso dall'acqua.

La soluzione diluita entra nell'evaporatore a 20°C; si opera in depressione alla pressione di esercizio di 0,4 ata ed in queste condizioni la soluzione bolle a 77,5°C. Come fluido di riscaldamento si utilizza vapore di rete a 6 ata. Per condensare i vapori uscenti dalla testa dell'evaporatore si utilizza un condensatore a superficie a fascio tubiero, che utilizza come fluido raffreddante acqua industriale, che entra a 15°C ed esce a 35°C.

Si può ritenere trascurabile l'effetto ebullioscopico ed assumere un valore unitario per il calore specifico a pressione costante ($C_p = 1$ kcal/kg·°C).

Determinare:

- 1) la portata oraria di soluzione concentrata
- 2) la portata oraria di vapore di rete
- 3) la superficie di scambio termico dell'evaporatore e del condensatore a fascio tubiero, considerando per entrambi un coefficiente globale di scambio termico $U_D = 1500$ kcal/m²·h·°C
- 4) la portata oraria di acqua necessaria alla totale condensazione dei vapori di solvente

Nella seguente tabella sono riportati i dati relativi ai vapori saturi circolanti nell'impianto, dove W è il vapore di rete e V il vapore sviluppato:

	P (ata)	T (°C)	h (kcal/kg)	λ (kcal/kg)
W	6	158,1	659,3	499,9
V	0,4	77,5	629,2	553,8

4. Si deve concentrare una soluzione acquosa di un prodotto organico dal 5% al 20% in massa mediante un evaporatore operante alla pressione di 0,4 ata: in queste condizioni la soluzione bolle alla temperatura di 75°C. La soluzione diluita, avente una portata di 500 kg/h, viene introdotta nell'evaporatore alla temperatura di 60°C; l'apparecchio viene riscaldato da vapore di rete a 6 ata. Per la condensazione del vapore svolto si utilizza un condensatore a miscela, alimentato con acqua a 15°C, nel quale la miscela condensata non supera la temperatura di 35°C

Si può trascurare l'IPE e il calore specifico della soluzione è pressoché coincidente con quello dell'acqua pura ($C_p = 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$). Sono altresì noti i seguenti dati di progetto, riferiti ai vapori saturi presenti nell'impianto, dove W è il vapore di rete e V il vapore sviluppato:

	P (ata)	T (°C)	h (kJ/kg)	λ (kJ/kg)
W	6	158	2760	2093
V	0,4	75	2634	2318

Con i dati a disposizione determinare:

- 1) la portata oraria di soluzione concentrata ottenuta
- 2) la potenza termica (kW) dell'evaporatore e la portata oraria del vapore di riscaldamento
- 3) l'area di scambio termico, sapendo che il coefficiente di scambio termico globale dell'evaporatore è pari a $420 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.
- 4) la portata oraria di acqua di raffreddamento al condensatore a miscela

5. Una soluzione acquosa di NaOH al 10% con una portata di 1000 kg/h viene concentrata al 30% mediante un evaporatore riscaldato con vapore di rete a 5 ata. Sono noti i seguenti dati di progetto:

- a) l'evaporatore opera alla pressione di 0,4 ata ed ha un $U_D = 1500 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$
- b) la soluzione diluita entra alla temperatura di 60°C
- c) il vapore svolto viene totalmente abbattuto in un condensatore barometrico alimentato con acqua di raffreddamento a 18°C. La miscela condensata esce alla temperatura di condensazione del vapore
- d) si possono considerare unitari i calori specifici delle soluzioni
- e) viene valutato un IPE pari a 15°C
- f) dati relativi ai vapori:
 - a. vapore di rete W: $T_W = 151^\circ\text{C}$, $h_W = 655,8 \text{ kcal/kg}$, $\lambda_W = 503,7 \text{ kcal/kg}$
 - b. vapore svolto V: $T_V = 75,4^\circ\text{C}$, $h_V = 629,5 \text{ kcal/kg}$, $\lambda_V = 554,1 \text{ kcal/kg}$, $C_{pV} = 0,45 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$
(dati riferiti al vapore saturo)

Determinare:

- 1) il consumo orario di vapore di rete
- 2) l'incremento percentuale dell'area di scambio termico dell'evaporatore dovuto all'IPE
- 3) il consumo di acqua al condensatore barometrico

NOTA – la soluzione degli esercizi richiede la costruzione dello schema quantificato con i dati iniziali, integrato progressivamente con le quantità calcolate nello svolgimento del problema

SOLUZIONE 1

Calcolo portata concentrato e vapore svolto

$$\begin{cases} F \cdot C_0 = S \cdot C_s & \text{bilancio soluto} \\ F = V + S & \text{bilancio totale materia} \end{cases}$$

$$S = F \cdot \frac{C_0}{C_s} = 24000 \cdot \frac{10}{25} = 9600 \text{ kg/h} \quad \text{concentrato}$$

$$V = F - S = 24000 - 9600 = 14400 \text{ kg/h} \quad \text{vapore svolto}$$

Calcolo consumo orario vapore di rete

$$W \cdot \lambda_W + F \cdot h_F = V \cdot h_V + S \cdot h_S \quad \text{bilancio entalpico}$$

$$W = \frac{V \cdot h_V + S \cdot h_S - F \cdot h_F}{\lambda_W}$$

$$h_S = C_{PS} \cdot T_S = 1 \cdot 82,7 = 82,7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad h_F = C_{PF} \cdot T_F = 1 \cdot 50 = 50 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$W = \frac{14400 \cdot 632,3 + 9600 \cdot 82,7 - 24000 \cdot 50}{521,4} = 16684 \text{ kg/h} \quad \text{consumo orario vapore di rete}$$

Calcolo portata oraria di acqua al condensatore barometrico

$$V \cdot h_V + F_A \cdot h_A = C \cdot h_C \quad \text{bilancio entalpico condensatore barometrico}$$

$$C = (V + F_A) \quad V \cdot h_V + F_A \cdot h_A = (V + F_A) \cdot h_C$$

$$V \cdot h_V + F_A \cdot h_A = V \cdot h_C + F_A \cdot h_C \quad F_A \cdot (h_C - h_A) = V \cdot (h_V - h_C)$$

$$F_A = \frac{V \cdot (h_V - h_C)}{(h_C - h_A)}$$

$$h_C = C_{PC} \cdot T_C = 1 \cdot 82,7 = 82,7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad h_A = C_{PA} \cdot T_A = 1 \cdot 18 = 18 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$F_A = \frac{14400 \cdot (632,3 - 82,7)}{(82,7 - 18)} = 122322 \text{ kg/h} \quad \text{consumo orario acqua al condensatore barometrico}$$

oppure, tenendo conto che l'IPE è trascurabile:

$$V \cdot \lambda_V = F_A \cdot C_{PA} \cdot (T_C - T_A) \quad \text{bilancio termico condensatore barometrico (senza IPE)}$$

$$F_A = \frac{V \cdot \lambda_V}{C_{PA} \cdot (T_C - T_A)} = \frac{14400 \cdot 549,7}{1 \cdot (82,7 - 18)} = 122344 \text{ kg/h} \quad \text{consumo orario acqua al condensatore barometrico}$$

Calcolo superficie di scambio termico

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T \quad Q = W \cdot \lambda_W = 16684 \cdot 521,4 = 8699038 \text{ kcal/h} \quad \text{potenza termica evaporatore}$$

$$A = \frac{Q}{U_D \cdot \Delta T} = \frac{8699038}{1800 \cdot (126,2 - 82,7)} = 111 \text{ m}^2 \quad \text{area scambio termico evaporatore}$$

SOLUZIONE 2

Calcolo portata alimentazione e vapore svolto

$$S = 30 \frac{\text{t}}{\text{giorno}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \cdot \frac{1 \text{ giorno}}{24 \text{ h}} = 1250 \text{ kg/h} \quad \text{portata oraria concentrato}$$

$$\begin{cases} F \cdot C_0 = S \cdot C_s & \text{bilancio soluto} \\ F = V + S & \text{bilancio totale materia} \end{cases}$$

$$F = S \cdot \frac{C_s}{C_0} = 1250 \cdot \frac{16}{8} = 2500 \text{ kg/h} \quad \text{alimentazione}$$

$$V = F - S = 2500 - 1250 = 1250 \text{ kg/h} \quad \text{vapore svolto}$$

Calcolo consumo orario vapore di rete

$$W \cdot \lambda_W + F \cdot h_F = V \cdot h_V + S \cdot h_S \quad \text{bilancio entalpico}$$

$$W = \frac{V \cdot h_V + S \cdot h_S - F \cdot h_F}{\lambda_W}$$

$$h_S = C_{PS} \cdot T_S = 4,18 \cdot 75 = 313,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_F = C_{PF} \cdot T_F = 4,18 \cdot 60 = 250,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W = \frac{1250 \cdot 263,4 + 1250 \cdot 313,5 - 2500 \cdot 250,8}{2156} = 1418 \text{ kg/h} \quad \text{consumo orario vapore di rete}$$

Calcolo area di scambio termico evaporatore

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T$$

$$U_D = 1400 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 1400 \frac{J}{s \cdot m^2 \cdot ^\circ C} = 1,4 \frac{kJ}{s \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$W = 1418 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1}{3600} \frac{h}{s} = 0,394 \frac{kg}{s}$$

$$Q = W \cdot \lambda_W = 0,394 \frac{kg}{s} \cdot 2156 \frac{kJ}{kg} = 849 \frac{kJ}{s} (kW) \quad \text{potenza termica evaporatore}$$

$$A = \frac{Q}{U_D \cdot \Delta T} = \frac{849}{1,4 \cdot (138 - 75)} = 9,6 \text{ m}^2 \quad \text{area scambio termico evaporatore}$$

Calcolo consumo orario di acqua al condensatore barometrico

$$V \cdot h_V + F_A \cdot h_A = (V + F_A) \cdot h_C \quad \text{bilancio entalpico condensatore barometrico}$$

$$V \cdot h_V + F_A \cdot h_A = V \cdot h_C + F_A \cdot h_C \quad F_A \cdot (h_C - h_A) = V \cdot (h_V - h_C)$$

$$F_A = \frac{V \cdot (h_V - h_C)}{(h_C - h_A)}$$

$$h_C = C_{pC} \cdot T_C = 4,18 \cdot 50 = 209 \frac{kcal}{kg} \quad h_A = C_{pA} \cdot T_A = 4,18 \cdot 18 = 75,2 \frac{kcal}{kg}$$

$$F_A = \frac{1250 \cdot (2634 - 209)}{(209 - 75,2)} = 22655 \text{ kg/h} \quad \text{consumo orario acqua al condensatore barometrico}$$

SOLUZIONE 3

Calcolo portata concentrato e vapore svolto

$$\begin{cases} F \cdot C_0 = S \cdot C_s & \text{bilancio soluto} \\ F = V + S & \text{bilancio totale materia} \end{cases}$$

$$S = F \cdot \frac{C_0}{C_s} = 800 \cdot \frac{5}{20} = 200 \text{ kg/h} \quad \text{concentrato}$$

$$V = F - S = 800 - 200 = 600 \text{ kg/h} \quad \text{vapore svolto}$$

Calcolo portata oraria vapore di rete

$$W \cdot \lambda_W + F \cdot h_F = V \cdot h_V + S \cdot h_S \quad \text{bilancio entalpico}$$

$$W = \frac{V \cdot h_V + S \cdot h_S - F \cdot h_F}{\lambda_W}$$

$$h_S = C_{pS} \cdot T_S = 1 \cdot 77,5 = 77,5 \frac{kJ}{kg} \quad h_F = C_{pF} \cdot T_F = 1 \cdot 20 = 20 \frac{kJ}{kg}$$

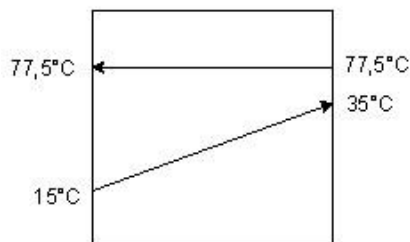
$$W = \frac{600 \cdot 629,2 + 200 \cdot 77,5 - 800 \cdot 20}{499,9} = 754 \text{ kg/h} \quad \text{vapore di rete}$$

Calcolo area di scambio termico evaporatore

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T \quad Q = W \cdot \lambda_W$$

$$A = \frac{W \cdot \lambda_W}{U_D \cdot \Delta T} = \frac{754 \cdot 499,9}{1500 \cdot (158,1 - 77,5)} = 3,1 \text{ m}^2 \quad \text{area scambio termico}$$

Calcolo area di scambio termico condensatore a superficie



$$Q_C = V \cdot \lambda_V \quad Q_C = U_D \cdot A_C \cdot \Delta T_{mi}$$

$$\Delta T_1 = (77,5 - 15) = 62,5^\circ C$$

$$\Delta T_2 = (77,5 - 35) = 42,5^\circ C$$

$$\Delta T_{mi} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(62,5 - 42,5)}{\ln \frac{62,5}{42,5}} = 51,9^\circ C$$

$$A_C = \frac{V \cdot \lambda_V}{U_D \cdot \Delta T_{mi}} = \frac{600 \cdot 559,8}{1500 \cdot 51,9} = 4,3 \text{ m}^2 \quad \text{area scambio termico condensatore}$$

Calcolo portata oraria acqua al condensatore a superficie

$$Q_C = F_A \cdot C_{pA} \cdot (T_u - T_i) \quad Q_C = V \cdot \lambda_V$$

$$F_A = \frac{V \cdot \lambda_V}{C_{PA} \cdot (T_M - T_i)} = \frac{600 \cdot 553,8}{1 \cdot (35 - 15)} = 16614 \text{ kg/h} \quad \text{acqua al condensatore}$$

SOLUZIONE 4

Calcolo portata concentrato e vapore svolto

$$\begin{cases} F \cdot C_0 = S \cdot C_S & \text{bilancio soluto} \\ F = V + S & \text{bilancio totale materia} \end{cases}$$

$$S = F \cdot \frac{C_0}{C_S} = 500 \cdot \frac{5}{20} = 125 \text{ kg/h} \quad \text{concentrato}$$

$$V = F - S = 500 - 125 = 375 \text{ kg/h} \quad \text{vapore svolto}$$

Calcolo portata oraria vapore di rete

$$W \cdot \lambda_W + F \cdot h_F = V \cdot h_V + S \cdot h_S \quad \text{bilancio entalpico}$$

$$W = \frac{V \cdot h_V + S \cdot h_S - F \cdot h_F}{\lambda_W}$$

$$h_S = C_{PS} \cdot T_S = 4,18 \cdot 75 = 313,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_F = C_{PF} \cdot T_F = 4,18 \cdot 60 = 250,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W = \frac{375 \cdot 2634 + 125 \cdot 313,5 - 500 \cdot 250,8}{2093} = 431 \text{ kg/h} \quad \text{vapore di rete}$$

Calcolo potenza termica evaporatore

$$Q = W \cdot \lambda_W \quad Q = 431 \cdot 2093 = 902083 \text{ kJ/h}$$

$$Q = 902083 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} = 251 \text{ kW} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right) \quad \text{potenza termica evaporatore}$$

Calcolo area scambio termico

$$Q = 251 \text{ kW} \cdot 1000 \frac{\text{W}}{\text{kW}} = 251000 \text{ W}$$

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T$$

$$A = \frac{Q}{U_D \cdot \Delta T} = \frac{251000}{420 \cdot (158 - 75)} = 7,2 \text{ m}^2 \quad \text{area scambio termico}$$

Calcolo consumo orario di acqua al condensatore barometrico

$$V \cdot h_V + F_A \cdot h_A = (V + F_A) \cdot h_C \quad \text{bilancio entalpico condensatore barometrico}$$

$$V \cdot h_V + F_A \cdot h_A = V \cdot h_C + F_A \cdot h_C \quad F_A \cdot (h_C - h_A) = V \cdot (h_V - h_C)$$

$$F_A = \frac{V \cdot (h_V - h_C)}{(h_C - h_A)}$$

$$h_C = C_{PC} \cdot T_C = 4,18 \cdot 35 = 146,3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad h_A = C_{PA} \cdot T_A = 4,18 \cdot 15 = 62,7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$F_A = \frac{375 \cdot (2634 - 146,3)}{(146,3 - 62,7)} = 11159 \text{ kg/h} \quad \text{consumo orario acqua al condensatore barometrico}$$

SOLUZIONE 5

Calcolo portata concentrato e vapore svolto

$$\begin{cases} F \cdot C_0 = S \cdot C_S & \text{bilancio soluto} \\ F = V + S & \text{bilancio totale materia} \end{cases}$$

$$S = F \cdot \frac{C_0}{C_S} = 1000 \cdot \frac{10}{30} = 333 \text{ kg/h} \quad \text{concentrato}$$

$$V = F - S = 1000 - 333 = 667 \text{ kg/h} \quad \text{vapore svolto}$$

Calcolo consumo orario vapore di rete

$$T_V = T_{V, SAT} + IPE = 75,4 + 15 = 90,4^\circ\text{C} \quad \text{temperatura di ebollizione della soluzione}$$

$$W \cdot \lambda_W + F \cdot h_F = V \cdot h_V + S \cdot h_S \quad \text{bilancio entalpico}$$

$$W = \frac{V \cdot h_V + S \cdot h_S - F \cdot h_F}{\lambda_W}$$

$$h_S = C_{pS} \cdot T_S = 1 \cdot 90,4 = 90,4 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad h_F = C_{pF} \cdot T_F = 1 \cdot 60 = 60 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$h_V = h_{V, SAT} + C_{pV} \cdot IPE = 629,5 + 0,45 \cdot 15 = 636,25 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$W = \frac{667 \cdot 636,25 + 333 \cdot 90,4 - 1000 \cdot 60}{503,7} = 783 \text{ kg/h} \quad \text{vapore di rete}$$

Calcolo incremento area di scambio termico dovuto a IPE

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T \quad Q = W \cdot \lambda_W = 783 \cdot 503,7 = 394397 \text{ kcal/h} \quad \text{potenza termica evaporatore}$$

$$A = \frac{Q}{U_D \cdot \Delta T} = \frac{394397}{1500 \cdot (151 - 90,4)} = 4,3 \text{ m}^2 \quad \text{area scambio termico con IPE}$$

$$A = \frac{Q}{U_D \cdot \Delta T} = \frac{394397}{1500 \cdot (151 - 75,4)} = 3,5 \text{ m}^2 \quad \text{area scambio termico trascurando IPE}$$

$$\frac{(4,3 - 3,5)}{3,5} \cdot 100 = 19\% \quad \text{incremento percentuale area scambio termico dovuto a IPE}$$

Calcolo acqua al condensatore barometrico

$$V \cdot (C_{pV} \cdot IPE + \lambda_V) = F_A \cdot C_{pA} \cdot (T_C - T_A) \quad \text{bilancio termico condensatore con IPE}$$

$$F_A = \frac{V \cdot (C_{pV} \cdot IPE + \lambda_V)}{C_{pA} \cdot (T_C - T_A)}$$

$$F_A = \frac{667 \cdot (0,45 \cdot 15 + 554,1)}{1 \cdot (75,4 - 18)} = 6517 \text{ kg/h} \quad \text{acqua al condensatore barometrico}$$