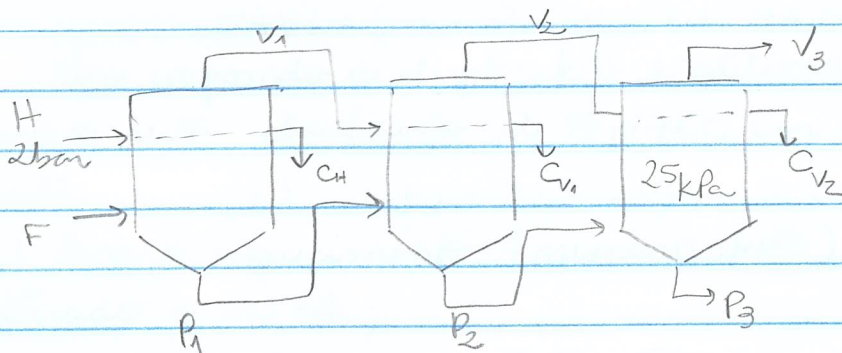


12 ou
Aula 13

Exercícios evaporadores

1) Uma solução é concentrada em um sistema de evaporação ^(alimentação diluída) em triplo efeito. Emprega-se o aquecedor do 1º efeito vapor saturado a 2 bar. A pressão de operação do terceiro efeito é de 25 kPa. Os coef. globais de transferência de calor são: $U_1 = 2800 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_2 = 2400 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $U_3 = 2000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Considere as áreas de TC iguais e despreze a elevação do ponto de ebulição EFE. Estime a temperatura de evaporação em cada evaporador ou efeito.



As taxas de TC em cada um dos efeitos são expressas conforme as eq:

$$\dot{q}_1 = U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_1$$

$$\dot{q}_2 = U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_2$$

$$\dot{q}_3 = U_3 \cdot A_3 \cdot \Delta T_3$$

Pl 1ª estimativa, considere a taxa de transferência de calor constante; como $A_1 = A_2 = A_3$ (dado):

$$\frac{\dot{q}_1}{A_1} = \frac{\dot{q}_2}{A_2} = \frac{\dot{q}_3}{A_3}$$

$$U_1 \cdot \Delta T_1 = U_2 \cdot \Delta T_2 = U_3 \cdot \Delta T_3$$

Definir a ΔT total de temperatura. (potencial térmico)
= T do vapor empurrado no 1º efeito - T vapor no último

Neste caso, GPE é desprezada (dados) efeito
ou T produzido em
efeito

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$$

$$\Delta T = T_H - T_{V1}$$

T_H (vapor saturado 2bar) = 120,2°C (interpolando)
 $L = 200 \text{ kPa}$

T_{V1} (pressão abs. no vapor último) = 64,7°C
efeito = 25 kPa

$$\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = \underbrace{120,2 - 64,7}_{55,5^\circ\text{C}} \quad (1)$$

Como

$$U_1 \Delta T_1 = U_2 \Delta T_2 = U_3 \Delta T_3 \quad (2)$$

Se usarmos de novo a eq. (1) em função de ΔT_1 :

$$U_1 \cdot \Delta T_1 = U_2 \cdot \Delta T_2$$

$$\Delta T_2 = \frac{U_1 \Delta T_1}{U_2} = \frac{2800 \Delta T_1}{2400} = 1,167 \Delta T_1 \quad (3)$$

$$\Delta T_3 = \frac{U_1 \Delta T_1}{U_3} = \frac{2800 \Delta T_1}{2000} = 1,4 \Delta T_1 \quad (4)$$

Substituindo (3) e (4) em (1):

$$\Delta T_1 + 1,167 \Delta T_1 + 1,4 \Delta T_1 = 55,5^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_1 = 15,5^\circ\text{C}$$

$$\therefore \Delta T_2 = 18,2^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = 21,8^\circ\text{C}$$

Soma tem que ser = 55,5°C



$$\Delta T_1 = 15,5 = T_4 - T_{V1}$$

$$T_{V1} = 120,2 - 15,5 =$$

$$\boxed{T_{V1} = 104,7^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T_2 = 18,2^\circ\text{C} = T_{V1} - T_{V2}$$

$$\boxed{T_{V2} = 86,5^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T_3 = 21,8^\circ\text{C} = T_{V2} - T_{V3}$$

$$\boxed{T_{V3} = 64,7^\circ\text{C}}$$

→ Verificar a pressão T_v na pressão indicada

Ok!

2) Um evaporador de duplo-efeito é utilizado para concentrar suco de fruta clarificado de 15 p/72°C em alimentações direta

i) Para o aquecimento (primeiro efeito) utilizar-se vapor saturado a 243 kPa;

ii) o suco entra no 1º efeito a 50°C e a vazão de 3800 kg/h [considere vazões de vapor de evaporação, iguais: ($\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2}$)]

iii) o coef. global de TC no 1º e 2º efeitos é de 1625 e 1280 $\text{W/m}^2\text{C}$.

iv) devido ao vácuo, a pressão no segundo evaporador é mantida a 61,3 kPa.

Determine:

a) a vazão de vapor consumido e o consumo do evaporador

b) a vazão de vapor produzida no efeito 1 e 2.

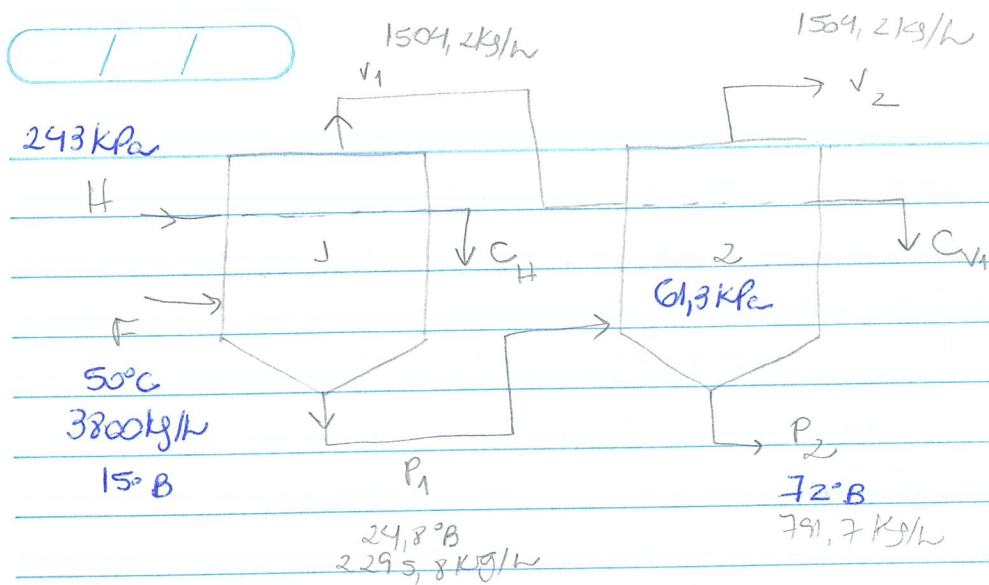
c) a área de troca térmica em cada evaporador

d) a elevação do ponto de ebulição da solução em cada efeito

e) a T de ebulição da solução em cada efeito

Dados:

$$C_p = 0,84 + 3,34 X_{\text{water}} \quad \text{KJ/kg}^\circ\text{C}$$



at 243 kPa $\Rightarrow T_H = 126,4^\circ\text{C}$ $\Delta_{\text{vap}}H_H = 2183,8 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

at 61,3 kPa $\Rightarrow T_{V_2}^{\text{SAT}} = 86,4^\circ\text{C}$ $H_{V_2}^{\text{SAT}} = 2654,41$

• Balanço de massa sólidos:

$$\dot{m}_F \cdot x_2 F = \dot{m}_{P_2} \cdot x_2 P_2$$

$$3800 \cdot 0,15 = \dot{m}_{P_2} \cdot 0,72$$

$$\dot{m}_{P_2} = 791,7 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_F = \dot{m}_{V_1} + \dot{m}_{P_1}$$

$$\dot{m}_{P_1} = 2295,8 \text{ kg/h}$$

$$0,15 \cdot 3800 = 2295,8 \cdot x_{2P_1}$$

$$x_{2P_1} = 0,248 \rightarrow 24,8\%$$

total

$$\dot{m}_F = \dot{m}_{P_2} + \dot{m}_{V_{\text{TOTAL}}}$$

$$3800 = 791,7 + \dot{m}_{V_{\text{TOTAL}}}$$

$$\dot{m}_{V_{\text{TOTAL}}} = 3008,3 \text{ kg/h}$$

Como $\dot{m}_{V_1} = \dot{m}_{V_2} = \frac{\dot{m}_{V_{\text{TOTAL}}}}{2}$

$$\dot{m}_{V_1} = \dot{m}_{V_2} = 1504,2 \text{ kg/h}$$

Para encontrar \dot{m}_H , precisamos resolver o BE.

• Balanço de energia no fuso 1:

$$\dot{m}_H \cdot \hat{H}_H^V + \dot{m}_F \cdot \hat{H}_F^L = \dot{m}_{C_H} \cdot \hat{H}_{C_H}^V + \dot{m}_{V_1} \cdot \hat{H}_{V_1}^V + \dot{m}_{P_1} \cdot \hat{H}_{P_1}^L$$

Para resolver este problema precisamos da temperatura de v_1 e P_1 , considerando GPEs; portanto, devemos calcular as GPEs inicialmente e os Cps de F e P_1 :

$$C_{pF} = 0,84 + 3,34(0,85) = 3,679 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$C_{pP_1} = 0,84 + 3,34(0,752) = 3,352 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$EPE_1 = \alpha \cdot C^{\beta} P^{\delta} \exp(\gamma C) \quad \left\{ \begin{array}{l} C: \text{concentração } (^{\circ}\text{Brix}) \\ P: \text{pressão mbar} \end{array} \right.$$

pl sucos:

$$\alpha = 1,36 \cdot 10^{-2}$$

$$\beta = 0,749$$

$$\delta = 0,106$$

$$\gamma = 3,39 \cdot 10^{-2}$$

Como temos P no efeito 2, vamos calcular inicialmente EPE_2 :

$$P_2 = 61,3 \text{ kPa} = 0,613 \text{ bar} = 613 \text{ mbar} \text{ e } C_{p2} = 72^{\circ}\text{B}$$

$$EPE_2 = 1,36 \cdot 10^{-2} (72)^{0,749} (613)^{0,106} (3,39 \cdot 10^{-2} \cdot 72)$$

$$\boxed{EPE_2 = 76^{\circ}\text{C}}$$

Como $T_{K2}^{\text{SAT}} = 86,4^{\circ}\text{C}$ ($P_2 = 61,3 \text{ kPa}$)

$$T_{P2} = T_{K2}^{\text{SAT}} + EPE_2$$

$$T_{P2} = 86,4^{\circ}\text{C} + 76^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{T_{P2} = 94,0^{\circ}\text{C} = T_{K2}^{\text{SUP}}}$$

pl encontrar EPE_1 , precisamos estimar a pressão absoluta no efeito 1.

$$\Delta T_{\text{TOTAL}} = T_H - T_{P2} = 126,4 - 94 = 32,4^{\circ}\text{C}$$

$$\therefore \Delta T_{\text{total}} = \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (1)$$

Se considerarmos pl 1ª estimativa $(\dot{q}/A)_1 = (\dot{q}/A)_2$

$$U_1 \cdot \Delta T_1 = U_2 \cdot \Delta T_2 \text{ , como } \dot{q} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

$$1625 \Delta T_1 = 1280 \Delta T_2$$

$$\Delta T_2 = 1,269 \Delta T_1$$

Substituindo na equação (1):

$$\Delta T_1 + 1,269 \Delta T_1 = 32,4^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_1 = 14,3^{\circ}\text{C}$$

$$\therefore \Delta T_2 = 18,1^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Como } \Delta T_1 = T_H - T_{P_1}^{eb}$$

$$14,3 = 126,4 - T_{P_1}^{eb}$$

$$T_{P_1}^{eb} = 112,1^\circ\text{C}$$

nesta T , T_{V_1} está superaquecido, mas vamos
chutar uma T pl encontrarmos

Podemos então encontrar a pressão pl uma T : (tabelo vs):

$$P_1 = 1537 \text{ kPa} = 1537 \text{ mbar}$$

Substituindo P_1 e $C_{P_1} = 24,8 \text{ Btu/l}^\circ\text{R}$ na equação da
EPE, encontraremos EPE₁:

$$EPE_1 = 1,36 \cdot 10^{-2} (24,8)^{0,749} (1537)^{0,106} e^{(339 \cdot 10^{-2} \cdot 24,8)}$$

$$EPE_1 = 0,76 \text{ a } 0,8^\circ\text{C}$$

$$T_{V_1}^{SAT} = T_{V_1}^{SUP} - EPE_1$$

$$T_{V_1}^{SAT} = 112,1 - 0,8$$

$$T_{V_1}^{SAT} = 111,3^\circ\text{C}, \text{ nesta } T \text{ encontraremos}$$

$$\hat{H}_{V_1}^v = 2698 \text{ kJ/kg}$$

Temos agora todas as variáveis pl resolver o balanço
de energia proposto:

$$\dot{m}_H \Delta_{\text{vap}} H_H + \dot{m}_F \cdot C_{PF} T_F = \dot{m}_{P_1}^{CA} T_{P_1} + \dot{m}_{V_1} \hat{H}_{V_1}^v$$

$$\dot{m}_H 2183,8 + \frac{3800 \text{ kg}}{\text{h}} \cdot \frac{3679 \text{ kJ}}{\text{kgK}} = 2295,8 \cdot 3352 \cdot 112,1 +$$

$$1504,2 \cdot 2698$$

$$\dot{m}_H = 1931,3 \text{ kg/h} = 0,536 \text{ t/s}$$

a taxa de transferência de calor no 1º efeito

$$\dot{q}_1 = 4A_1 \cdot \Delta T_1$$

$$\dot{q}_1 = \dot{m}_H \Delta_{\text{vap}} H = \frac{1931,3 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \cdot 2183,8 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{q}_1 = 1171,6 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \text{ ou kW}$$

é a economia de vapor:

$$\dot{q}_2 = \frac{1504,2 \text{ kg}}{3600 \text{ kg}} \cdot \Delta_{\text{vap}} H_{\text{v2}}^{\text{SAT}}$$

a 111,3°C → 2226 KJ/kg

$$\dot{q}_2 = 930,1 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_H \text{ (efeito 1)} = 1931,3 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{v_1} \text{ (efeito 2)} = 1504,2 \text{ kg/h}$$

$$\dot{q}_1 = U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_1$$

$$1171,6 \cdot 10^3 \text{ W} = 1625 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \cdot A_1 \cdot 14,3^\circ \text{C}$$

$$\underline{A_1 = 50,4 \text{ m}^2}$$

$$\dot{q}_2 = U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_2$$

$$930,1 \cdot 10^3 = 1280 \cdot A_2 \cdot 18,1^\circ \text{C}$$

$$\underline{A_2 = 40,1 \text{ m}^2}$$

$$\text{EPE}_1 = 0,76^\circ \text{C}$$

$$\text{EPE}_2 = 7,6^\circ \text{C}$$

$$T_{p_1} = 112,1^\circ \text{C}$$

$$T_{p_2} = 94,0^\circ \text{C}$$

Ex. Infusão de vapor

2000 kg/h de leite é esterilizado por infusão de vapor.
 O leite é aquecido até 145°C na câmara H e é rapidamente resfriado em uma câmara tipo flash (F).
 O vapor em excesso do tanque flash é condensado no trocador C, a fim de entrar a diluição do leite. Calcule a vazão de água fria no trocador C necessária para manter a baixa pressão de vapor requerida no Flash.

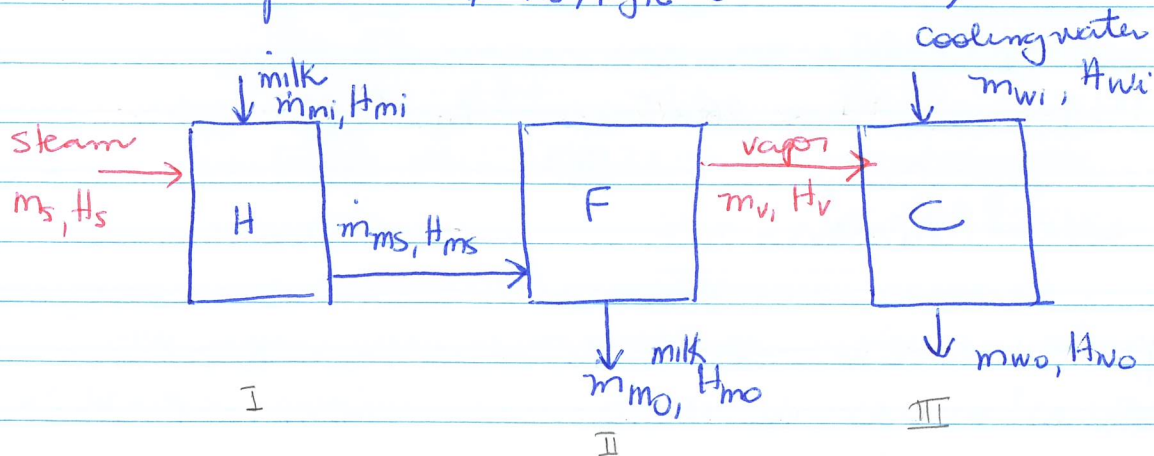
Dados: $T_{\text{leite}} (H) = 40^\circ\text{C}$

$T_{\text{água no condensador}} (C) = 20^\circ\text{C}$

Pressão de vapor infusão (H): $475,8 \text{ kPa}$

$C_p \text{ leite} = 3,8 \text{ kJ/kgK}$ (entrada de H)

$C_p \text{ leite} = 4,0 \text{ kJ/kgK}$ (saída de H)



Tanque flash: retira vapor volátil de um alimento, opera em vácuo

1º passo: Balanço de massa/energia em H (aquecimento) para encontrar as outras variáveis m_s e m_{ms} .

2º passo: BM/BE no Tanque Flash para encontrar (m_v e m_{mo})

3º passo: BM/BE no condensador

- Dificuldade: encontrar as T_{eb} no tanque F p/ cálculo das entalpias, pois nã foi fornecida a pressão

Resolução:

1º passo: BM em H: BE em H

$$\dot{m}_s + \dot{m}_{mi} = \dot{m}_{ms}$$

$$\dot{m}_s + 2000 \text{ kg/h} = \dot{m}_{ms} \quad (1)$$

$$\dot{m}_s H_s^V + \dot{m}_{mi} H_{mi}^L = \dot{m}_{ms} \hat{H}_{ms}^L \quad (2)$$

$$\downarrow \rightarrow T_v = 149,96^\circ\text{C}$$

$$\text{a } 475,8 \text{ kPa: } H^V = 2745,6$$

$$H_{mi}^L = c_{pmi} \cdot T_{mi} = 3,8 \text{ kJ} \cdot 40^\circ\text{C} = 152 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_{ms}^L = c_{pms} \cdot T_{ms} = 4,0 \cdot 145 = 580 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Substituindo os valores e a equação (1) em (2), temos:

$$\dot{m}_s \cdot 2745,6 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + 2000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 152 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = (\dot{m}_s + 2000) \cdot 580 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$(2745,6 - 580) \dot{m}_s \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 1160000 - 304000 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right]$$

$$\dot{m}_s = 395,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

E, pela eq (1):

$$\dot{m}_{ms} = 2395,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

2º passo

Balanço de massa em F.

$$\dot{m}_{ms} = \dot{m}_v + \dot{m}_{mout} \quad (3)$$

Como não há diluição do leite, a quantidade de Sólidos na entrada e saída devem ser iguais:

$$\dot{m}_{mi} \cdot X_{s,mi} = X_{s,mo} \cdot \dot{m}_{mo}$$

$$\therefore \dot{m}_{mi} = \dot{m}_{mo} = 2000 \text{ kg/h}$$

Sabemos do 1º passo que $\dot{m}_{ms} = 2395,3 \text{ kg/h}$

Assim, a quantidade de vapor a ser evaporada deve ser igual a quantidade incorporada no aquecimento:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_s = 395,3 \text{ kg/h}$$

Agora, será necessário fazer o BE pl encontrar a T de saída do vapor, pois essa T deverá ser utilizada no BE do condensador. Por BM é impossível encontrar a quantidade de água (\dot{m}_{wi})

$$\text{pois: } \dot{m}_{wo} = \dot{m}_v + \dot{m}_{wi}$$

Voltando ao BE em F:

$$\dot{m}_{ms} \cdot H_{ms}^L = \dot{m}_v + H_v^v + \dot{m}_{mout} H_{mout}^L \quad (4)$$

$$H_{ms}^L = 4,0 \cdot 145 = 580 \text{ KJ/kg} \quad (\text{calculado anteriormente})$$

H_v^v (?) pois não sabemos nem a p nem T.

$$H_{mout}^L = c_{pmat} T_{mat} = 3,8 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot T_{mat}$$

mesma composição de \dot{m}_{in}

Qual a relação entre T_{mout} e T_v ?

Direm se iguais!!

Portanto podemos fazer iterações até encontrar mesmos valores:

chutar temperaturas que estão na tabela p/ facilitar encontrar H_v

1ª iteração: $T_v = 131,2^\circ\text{C} \rightarrow H_v = 2722 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$

Substituindo na eq (4) do BE, encontramos T_{mout} :

$$\underbrace{2395,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}_{1389,274} \cdot 580 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 395,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 2722 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} + 2000 \cdot 3,8 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot T_{mout}$$

$$T_{mout} = 41,2^\circ\text{C}$$

2ª iteração: $T_v = 41,2^\circ\text{C} \rightarrow H_v (\text{tabela}) = 2576,8 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$

$$T_{mout} = 48,8^\circ\text{C}$$

3ª iteração: $T_v = 48,9^\circ\text{C} \rightarrow H_v (\text{tabela}) = 2590,4 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$

$$T_{mout} = 48,1^\circ\text{C}$$

4ª iteração: $T_v = 48,1^\circ\text{C} \rightarrow H_v (\text{tabela}) = 2589,0 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$

$$T_{mout} = 48,1^\circ\text{C}$$

OK

Portanto a T de vaporização dentro do flash é

$$48,1^\circ\text{C}$$

3º Pass: BM no condensador:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{wo} - \dot{m}_{wi}$$

BE no condensador

$$\dot{m}_v H_v + \dot{m}_{wi} H_{wi}^L = \dot{m}_{wo} H_{wo}^L \quad (5)$$

$$395,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 2589,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \dot{m}_{wi} (42 \cdot 20) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} =$$

$$= (\dot{m}_v + \dot{m}_{wi}) H_{wo}^L$$

↳ (?)

Restrição, pl condensar toda a massa de vapor \dot{m}_v

$$T_{wo} \leq 48,1^\circ\text{C}$$

(condição limite) → Se for maior não condensa!!

$$\text{Na } T = 48,1^\circ\text{C} \rightarrow H_{wo}^L = 42 \cdot 48,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 20202 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

ou pela Tabela $H^L = 201,4 \text{ kJ/kg}$

Substituindo na eq (5).

$$1023431,7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + \dot{m}_{wi} \cdot 84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = (395,3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + \dot{m}_{wi}) 20202 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_{wi} = 7995,0 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Ex. Congelamento

Calcular o tempo de congelamento de um bloco de carne de dimensões: $1\text{ m} \times 0,25\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ ($\lambda = 1,18$), considerando:

- (i) conteúdo inicial de produto é $71,5\text{ g}/100\text{ g}$,
- (ii) que a fração mássica de gelo formada foi estimada em $56\text{ g}/100\text{ g}$ de produto

Dados:

$k^c = 1,108\text{ W/mK}$	(condutividade do AL congelado)
$h = 30\text{ W/m}^2\text{K}$	(coef de TC por convecção)
$C_p^u = 3,52\text{ kJ/kgK}$	(C_p do alimento \bar{n} congelado)
$C_p^c = 2,052\text{ kJ/kgK}$	(C_p " " congelado)
$T_i = 5^\circ\text{C}$	(T inicial)
$T = -10^\circ\text{C}$	(T)
$T_{ie} = -1,75^\circ\text{C}$	(
$\rho = 1050\text{ kg/m}^3$	(densidade)
$D_{fus} H_w = 333,22\text{ kJ/kg}$	($\Delta H_{\text{fusão}} \text{ água}$)

Cinética de congelamento:

$$t^c = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right] \left[\frac{e}{2h} + \frac{e^2}{8k^c} \right]$$

$$\Delta H_1 = \rho \cdot C_p^u (T_i - \bar{T})$$

$$\Delta H_2 = \rho \cdot X_i \Delta_{fus} H + \rho \cdot C_p^c (\bar{T} - T)$$

$$\Delta T_1 = 0,5 (T_i - \bar{T}) - T_\infty$$

$$\Delta T_2 = \bar{T} - T_\infty$$

$$\bar{T} = 1,8 + 0,263 T + 0,105 T_\infty$$

Inicialmente encontra-se a $T_{m\u00e9dia}$ pela equa\u00e7\u00e3o:

$$\bar{T} = 1,8 + 0,263 T + 0,105 T_{\infty}$$

$$\bar{T} = 1,8 + 0,263 \cdot (-10) + 0,105 \cdot (-30)$$

$$\bar{T} = -3,98 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_1 = 0,5 (T_i + \bar{T}) - T_{\infty}$$

$$\Delta T_1 = 0,5 [5 + (-3,98)] - (-30)$$

$$\Delta T_1 = 30,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_2 = \bar{T} - T_{\infty} = -3,98 - (-30)$$

$$\Delta T_2 = 26,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta H_1 = \rho \cdot C_p^v (T_i - \bar{T})$$

$$\Delta H_1 = 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} [5 - (-3,98)] \text{ }^{\circ}\text{C ou K}$$

$$\Delta H_1 = 33190,1 \text{ kJ/m}^3$$

$$\Delta H_2 = \rho \cdot X_1 \Delta_{\text{fus}} H_w + \rho \cdot C_p^c (\bar{T} - T)$$

?

(4) Considerando que o cont\u00e9\u00fado inicial de \u00e1gua seca $74,5 \text{ g/100g}$

$$X_1 = 0,745$$

$$\Delta H_2 = 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,745 \cdot 333,22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,052 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$[-3,98 - (-10)] \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta H_2 = 273632,0 \text{ kJ/m}^3$$

(ii) Considerando que a fração mássica de gelo formada seja 0,56 ou 56 g/100g:

$$\Delta H'_2 = 1050 \cdot 0,56 \cdot 333,22 + 1050 \cdot 2,052 [-3,98 - (-10)]$$

$$\Delta H'_2 = 208962,8 \text{ kJ/m}^3$$

Aplicando a eq. p/ cálculo de t^c p/ os blocos de carne, temos: o tempo p/ as duas situações:

$$(i) \quad t^c = \frac{1}{1,18} \left[\frac{33190,1}{39,51} + \frac{273632}{26,02} \right] \frac{10^3 \text{ J}}{\text{m}^3 \cdot \text{C}} \left[\frac{0,25 \text{ m}}{2 \cdot 30 \text{ W}} + \frac{(0,25)^2 \text{ m}^2}{8 \cdot 1,108 \text{ W}} \right] \frac{\text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$t^c = 9833,95 \left[\frac{10^3 \text{ J}}{\text{m}^3 \cdot \text{C}} \right] \cdot 0,01122 \left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{m}}{\text{J}} \right]$$

$$t^c = 110314 \text{ s ou } 30,6 \text{ h}$$

(ou)

$$(ii) \quad t^c = \frac{1}{1,18} \left[\frac{33190,1}{39,51} + \frac{208962,8}{26,02} \right] \cdot 10^3 \cdot 0,01122$$

$$t^c = 86704,9 \text{ s} = 24,1 \text{ h}$$

O tempo de congelamento, sem considerar a fração mássica de gelo formado, foi quase 30% superior!