



## Esercitazioni del corso "FONDAMENTI DI PROCESSI CHIMICI"

Prof. Gianpiero Groppi

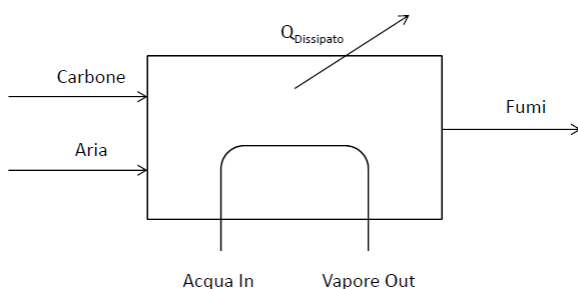
### ESERCITAZIONE 2

#### Analisi di una caldaia a polverino di carbone

In una centrale termoelettrica, una caldaia viene alimentata con polverino di carbone avente la seguente composizione ponderale su base secca e priva di ceneri:

C	85.5%
H	5.5%
N	1%
S	1%
O	7%

Il carbone contiene una percentuale ponderale di umidità e ceneri rispettivamente del 8% e del 6%. Il carbone entra in caldaia a 25°C e 1 bar e viene bruciato con aria a 50°C in eccesso del 30%, a pressione atmosferica, con un umidità relativa del 25%. Dalla caldaia i fumi escono a 150°C e viene prodotto vapore saturo a 28 bar e 238°C a partire da acqua a 90°C e 28 bar (trascurare l'effetto della pressione sul contenuto entalpico dell'acqua). Si chiede di calcolare la quantità di vapore prodotto per kg di combustibile e il rendimento della caldaia assumendo che il calore disperso verso l'esterno sia pari al 3% del potere calorifico inferiore del combustibile.



**DATI**

Carbone:  $T_{IN} = 25^{\circ}\text{C}$

Formula di Dulong per la stima del PC del carbone

$$PCS = 338.7 \cdot C + 1445 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 94.3 \cdot S \frac{kJ}{kg}$$

$$PCI = PCS - 25.0 \cdot (U + 9 \cdot H) \frac{kJ}{kg}$$

U = frazione di umidità

Aria:  $T_{IN} = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 1\text{atm}$ , U.R. = 25% a  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{SAT}^{H_2O}(50^{\circ}\text{C}) = 12.349 \text{ kPa}$

Acqua/Vapore:  $h_{H_2O}^{IN}(90^{\circ}\text{C}) = 376.92 \text{ kJ/kg}_{H_2O}$   $h_{H_2O}^{OUT}(238^{\circ}\text{C}) = 2804 \text{ kJ/kg}_{H_2O}$

Fumi:  $T_{OUT} = 150^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 1\text{atm}$

### Risoluzione

Si imposta la risoluzione partendo da una base di calcolo di 100 kg C daf (dry & ash free). È così possibile calcolare la composizione di alimentazione riferita alla carica di carbone daf, prestando attenzione al calcolo del quantitativo di acqua e ceneri. Infatti, mentre l'analisi elementare è riferita alla parte secca e priva di ceneri daf, la frazione di umidità e quella di ceneri sono riferite alla base tal quale del carbone. La base tal quale del carbone comprende la frazione di umidità, la frazione di ceneri e la parte combustibile daf, che rappresenta l'86% del totale al netto del contenuto di acqua e ceneri.

$$m_{H_2O} = 100 kg_{C,daf} \cdot 0.08 \frac{kg_{H_2O}}{kg_{C,tal\ quale}} \cdot \frac{100}{86} \frac{kg_{C,tal\ quale}}{kg_{C,daf}} = 9.30 kg_{H_2O}$$

$$m_{Ash} = 100 kg_{C,daf} \cdot 0.06 \frac{kg_{Ash}}{kg_{C,tal\ quale}} \cdot \frac{100}{86} \frac{kg_{C,tal\ quale}}{kg_{C,daf}} = 6.98 kg_{Ash}$$

Da cui si ricava la seguente composizione di ingresso associata alla carica di carbone daf:

Specie	m <sub>i</sub> (kg)
<b>C</b>	85.50
<b>H</b>	5.50
<b>N</b>	1.00
<b>S</b>	1.00
<b>O</b>	7.00
<b>ceneri</b>	6.98
<b>H<sub>2</sub>O (umidità)</b>	9.30

Sulla base dei bilanci di materia è possibile calcolare la quantità di aria necessaria per la combustione del carbone alimentato:

$$\alpha_{st} = 4.31 \cdot \frac{8H + 2.667C + S - O^*}{100} = 4.31 \cdot \frac{8 \cdot 5.5 + 2.667 \cdot 85.5 + 1 - 1}{100} = 11.466 \text{ kg}_{aria} / \text{kg}_{C,daf}$$

$$\alpha = \alpha_{st} \cdot \left(1 + \frac{e\%}{100}\right) = 14.905 \text{ kg}_{aria} / \text{kg}_{C,daf}$$

$$n_{aria} = \frac{14.905}{28.96} \frac{kmol_{aria}}{kg_{C,daf}} \cdot 100 kg_{C,daf} = 51.470 \text{ kmol}_{aria}$$

Dal dato di umidità relativa della corrente di aria in ingresso si calcola la quantità di acqua introdotta nel sistema assieme all'aria:

$$x_{H_2O} = \frac{U.R. \cdot P_{H_2O}^{sat}(50^\circ C)}{100 \cdot P} = \frac{12.349}{101.325} \cdot 0.25 = 0.03047$$

$$n_{H_2O}^{Umidità} = n_{aria} \cdot \frac{x_{H_2O}}{1 - x_{H_2O}} = 1.617 \text{ kmol}_{H_2O}$$

Stabilita la base del carbone e calcolata la quantità di aria e vapore acqueo entranti, è possibile risolvere i bilanci di materia e determinare la portata e la composizione dei fumi in uscita:

$$n_{CO_2} = \frac{85.5}{12} = 7.125 \text{ kmol}_{CO_2}$$

$$n_{H_2O} = 1.617 + \frac{5.5}{2} + 8 \cdot \frac{100}{86} \cdot \frac{1}{18} = 4.884 \text{ kmol}_{H_2O}$$

$$n_{N_2} = 1490.56 \text{ kg}_{Aria\ Secca} \cdot \frac{3.31 \text{ kg}_{N_2}}{4.31 \text{ kg}_{Aria\ Secca}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}_{N_2}}{28.15 \text{ kg}_{N_2}} + \frac{1}{28} \text{ kmol}_{N_2} = 40.701 \text{ kmol}_{N_2}$$

$$n_{O_2} = 1146.58 \text{ kg}_{Aria\ Secca} \cdot \frac{1 \text{ kg}_{O_2}}{4.31 \text{ kg}_{Aria\ Secca}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}_{O_2}}{32 \text{ kg}_{O_2}} \cdot 0.3 = 2.494 \text{ kmol}_{O_2}$$

$$n_{SO_2} = \frac{1}{32} = 0.031 \text{ kmol}_{SO_2}$$

Si ottengono pertanto le seguenti composizioni per i flussi in ingresso e in uscita dal combustore:

Specie	n <sup>OUT</sup> (kmol)	x%
<b>CO<sub>2</sub></b>	7.125	12.90
<b>H<sub>2</sub>O</b>	4.884	8.84
<b>SO<sub>2</sub></b>	0.031	0.06
<b>N<sub>2</sub></b>	40.701	73.68
<b>O<sub>2</sub></b>	2.494	4.52

Si nota che il flusso in uscita di SO<sub>2</sub> è molto inferiore rispetto a quelli delle altre specie ed è perciò trascurabile il suo contributo nel bilancio entalpico. Per il calcolo del bilancio entalpico, si trascura anche il flusso dovuto alle ceneri. Considerato un volume di analisi che comprende caldaia e il serpentino di scambio termico e produzione di vapore, la scrittura del bilancio entalpico è quindi la seguente:

$$\sum_{i=1}^{\text{Reagenti}} n_i^{IN} \cdot \int_{298K}^{T_{IN}} \bar{C}_{P,i} \cdot dT - \sum_{i=1}^{\text{Prodotti}} n_i^{OUT} \cdot \int_{298K}^{T_{OUT}} \bar{C}_{P,i} \cdot dT - Q_{\text{Dissipato}} + \dot{m}_C \cdot PCI_{\text{Carbone}} = \dot{m}_{H_2O} \cdot (\hat{h}_{H_2O}^{out} - \hat{h}_{H_2O}^{in})$$

Nella scrittura del bilancio entalpico è importante notare che il riferimento della corrente di acqua che viene vaporizzata al serpentino di scambio termico è diverso da quello assunto per la corrente reagente. Infatti:

corrente gas: pressione, temperatura e composizione a cui è noto il  $\Delta H^{\circ}_c$  del combustibile ( $T_{RIF} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{RIF} = 1 \text{ atm}$ )

corrente acqua: punto triplo ( $T_{RIF} = 0.01^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{RIF} = 611.73 \text{ Pa}$ ), liquido

La scelta di due riferimenti differenti è possibile dal momento in cui le due correnti sono segregate dal punto di vista dello scambio di materia. Si nota inoltre che nel caso dell'acqua il sistema di riferimento implicitamente fissa ancora la composizione (acqua pura) e lo stato (liquido). Il Potere Calorifico Inferiore del carbone viene calcolato attraverso la formula di Dulong sulla base della composizione ottenuta per il carbone daf:

$$PCS = 338.7 \cdot C + 1445 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 94.3 \cdot S = 35736.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{C,daf}}$$

$$PCI = PCS - 25.0 \cdot (U + 9 \cdot H) = 34266.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{C,daf}}$$

Il calore dissipato per unità di peso di carbone daf è riferito al PCI del carbone:

$$\hat{Q}_D = 34266.22 \cdot 0.03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{C,daf}} = 1027.99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{C,daf}}$$

Nel caso dei flussi entalpici delle singole specie, considerato il riferimento implicito nell'utilizzo dei  $\Delta H^{\circ}_c$  ( $T_{RIF} = 25^{\circ}\text{C}$ ), si ottiene:

Specie	$n_i$ (kmol)	$C_p$ (50°C)	$H_i$ (kJ)
<b>Aria</b>	51.470	29.10	37448.37
<b>H<sub>2</sub>O</b>	1.617	33.73	1363.82
<b>totale</b>			38812.19

Per il calcolo dei quali si è utilizzato il valore di  $C_p(50^\circ\text{C})$  medio:

$$n_{aria}^{in} \cdot \int_{25^\circ\text{C}}^{T_{IN}} \bar{C}_{P,aria} \cdot dT + n_{H_2O}^{in} \cdot \int_{25^\circ\text{C}}^{T_{IN}} \bar{C}_{P,H_2O} \cdot dT = (n_{aria}^{in} \cdot \bar{C}_{P,aria}^{medio} + n_{H_2O}^{in} \cdot \bar{C}_{P,H_2O}^{medio}) \cdot (T_{IN} - 25)$$

Allo stesso modo, nel calcolo dei flussi entalpici uscenti dalla caldaia associati ai fumi, si ottiene:

Specie	$n_i$ (kmol)	$C_p$ (150°C)	$H_i$ (kJ)
<b>N<sub>2</sub></b>	40.701	29.24	148761.23
<b>O<sub>2</sub></b>	2.494	30.06	9371.27
<b>CO<sub>2</sub></b>	7.125	39.54	35215.31
<b>H<sub>2</sub>O</b>	4.884	34.13	20837.62
<b>Totale</b>			214185.42

Da cui, sostituendo nel bilancio entalpico e risolvendo rispetto alla portata massiva di vapore prodotto, si ottiene:

$$\dot{m}_{H_2O} = 1297.22 \text{ kg}_{H_2O}$$

$$\frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{C,daf}} = 12.97 \frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{C,daf}}$$

Il rendimento della caldaia è calcolabile come segue:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot (\hat{h}_{H_2O}^{vap} - \hat{h}_{H_2O}^{liq})}{\dot{m}_{C,daf} \cdot PCI_{C,daf}} = 0.9188$$