

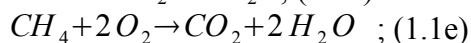
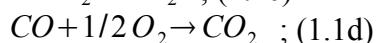
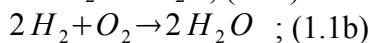
1. CALCOLO DELLA QUANTITÀ D'ARIA NECESSARIA ALLA COMBUSTIONE DI UN DATO COMBUSTIBILE

1.1. Reazioni di combustione stechiometrica di un idrocarburo C_mH_n

Componente	Simbolo	Peso molecolare (M)
Carbonio	C	(12)
Idrogeno	H_2	(2)
Zolfo	S	(32)
Monossido di carbonio	CO	(28)
Metano	CH_4	(16)
Formula generale	C_mH_n	(12m+1n)

Tab.1

Le reazioni di ossidazione delle specie chimiche riportate in Tab.1 sono riassunte di seguito:



In forma generale, la reazione di ossidazione di un generico idrocarburo avente m atomi di carbonio ed n di idrogeno è:



Relativamente alle reazioni 1.1a,b,c,d,e,f è possibile calcolare la quantità di comburente (O_2) necessaria per la combustione di 1 kg di ciascuna specie chimica.

Reazione	kg O_2 /kg Specie chimica
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$O_2/C = 2(M)_O/(M)_C = 2 \times 16/12 = 2.667$
$2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$	$O_2/(2 \times H_2) = 32/4 = 8$
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	$O_2/S = 32/32 = 1$
$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	$O_2/CO = 16/(12+16) = 0.571$
$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$	$O_2/CH_4 = 64/16 = 4$
$C_mH_n + (m+n/4)O_2 \rightarrow mCO_2 + n/2 H_2O$	$O_2/C_mH_n = 32(m+n/4)/(12m+n)$

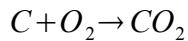
Tab.2

Dalla conoscenza della quantità in kg di O_2 necessaria per la combustione di 1 kg di combustibile, è semplice risalire ai kg d'aria necessari alla combustione di 1 kg di combustibile; infatti, in un kg d'aria la percentuale in massa di O_2 è di circa il 23%.

$$kg_{[O_2]}/kg_{ARIA} = 0.232 \rightarrow kg_{ARIA}/kg_{[O_2]} = 4.31 \quad (1.2)$$

Pertanto per ottenere la quantità stochiometrica¹ di aria necessaria alla combustione, basterà moltiplicare le quantità di ossigeno riportate in Tab.2 per 4.31.

Quanto è stato fino ad ora riferito alle masse può essere espresso in termini di volumi (o di moli, il che è lo stesso), infatti se si considera a titolo di esempio la reazione di ossidazione del carbonio



tale reazione esprime in che rapporto si trovano le moli (volumi) delle specie in gioco. In poche parole, per ogni mole (o Nm^3) di carbonio è necessaria una *mol* (1 Nm^3) di O_2 . Precedentemente questi rapporti stochiometrici sono stati espressi in masse; infatti nel caso specifico del carbonio abbiamo che $kg_{(O_2)}/kg_C = 2(M)_O/(M)_C = 2 \times 16/12 = 2.667$. In Tab.3 sono espressi i rapporti stochiometrici in volumi delle reazioni già espresse precedentemente.

Reazione	$Nm^3 O_2 /Nm^3 specie chimica$
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$Nm_{(O_2)}^3 / Nm_{(C)}^3 = 1$
$2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2 O$	$Nm_{(O_2)}^3 / Nm_{(H_2)}^3 = 1/2 = 0.5$
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	$Nm_{(O_2)}^3 / Nm_S^3 = 1/1 = 1$
$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	$Nm_{(O_2)}^3 / Nm_{(CO)}^3 = (1/2)/1 = 0.5$
$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2 O$	$Nm_{(O_2)}^3 / Nm_{(CH_4)}^3 = 2/1 = 2$
$C_m H_n + (m+n/4) O_2 \rightarrow m CO_2 + n/2 H_2 O$	$Nm_{(O_2)}^3 / Nm_{(C_m H_n)}^3 = (m+n/4)$

Tab.3

Anche in questo caso è possibile risalire alla quantità stochiometrica di aria espressa in Nm^3 , infatti la percentuale volumetrica di O_2 in un Nm^3 di aria è del 21%, quindi si avrà che:

$$Nm_{(O_2)}^3 / Nm_{ARIA}^3 = 0.21 \rightarrow Nm_{ARIA}^3 / Nm_{(O_2)}^3 = 1/0.21 = 4.76 \quad (1.3)$$

Dunque per calcolare la quantità stochiometrica d'aria basterà moltiplicare la quantità di O_2 per 4.76; se si considera per esempio il caso del metano (CH_4):

$$Nm_{ARIA}^3 / Nm_{(CH_4)}^3 = 2 \times 4.76 = 9.52 \quad (1.4)$$

1.2. Rapporto C/H – Rapporto stochiometrico ARIA-COMBUSTIBILE

Molto spesso i combustibili (in particolare quelli liquidi) vengono identificati con il rapporto tra la quantità di carbonio e quella di idrogeno, detta appunto rapporto $\frac{C}{H}$. Se tale rapporto viene assegnato, è possibile risalire alle percentuali di C e H rispettivamente contenute nel combustibile nonché alle quantità di O_2 e aria stochiometrica. In particolare, la quantità di O_2 necessaria alla combustione di un combustibile caratterizzato da un certo rapporto $\frac{C}{H}$ è ottenibile come segue:

¹ La quantità stochiometrica d'aria è quella strettamente necessaria per ottenere una combustione completa; in realtà, le quantità d'aria utilizzate al fine di una combustione completa sono superiori a quelle stochiometriche

$$\frac{kg_{(O_2)}}{kg_{FUEL}} = (kg_{(O_2)}/kg_C)(\frac{C}{(C+H)}) + (kg_{(O_2)}/kg_{(H_2)})(\frac{H}{(C+H)}) \quad (1.5)$$

dove $kg_{(O_2)}/kg_C = 2.667$, $kg_{(O_2)}/kg_{(H_2)} = 8$ (già espressi in Tab.2), C e H rappresentano le percentuali di carbonio ed idrogeno presenti nel combustibile.

Al secondo membro, dividendo al numeratore e denominatore entrambi i termini per H si ottiene che

$$\frac{kg_{(O_2)}}{kg_{FUEL}} = 2.667(\frac{C/H}{(C/H+1)}) + 8(\frac{1}{(1+C/H)}) \quad (1.6)$$

Si noti come la (1.5) non è altro che una media pesata di C e H (moltiplicati rispettivamente per i rapporti stechiometrici di C e H_2) dove il “peso” è rappresentato dalla somma $C+H$. Se tale somma rappresenta la composizione totale del combustibile, ragionando in termini percentuali essa sarà uguale a 100; pertanto assegnato $\frac{C}{H}$ le percentuali singole di C ed H sono facilmente ricavabili.

Supponiamo ad esempio $\frac{C}{H} = 7$; se $C+H=100$ si ricava semplicemente che $H=12.5\%$ e $C=100-H=87.5\%$. Applicando la formula (1.6), basterà sostituire il valore assegnato di $\frac{C}{H}$, nel nostro caso pari a 7, per ottenere a quantità di O_2 necessaria per kg_{FUEL} . Si ottiene che:

$$\frac{kg_{(O_2)}}{kg_{FUEL}} = 3.33$$

Come già detto, la quantità stechiometrica d'aria è ricavabile moltiplicando $\frac{kg_{(O_2)}}{kg_{FUEL}}$ per 4.31, dal momento che stiamo lavorando sulle masse e non sui volumi.

$$kg_{ARIA}/kg_{FUEL} = 3.33 \times 4.31 = 14.35$$

E' noto che tale rapporto prende il nome di *rapporto stechiometrico aria - combustibile* e si indica con α_{ST} .

Se si considera la combustione del metano, seguendo i procedimenti descritti fino ad ora possiamo calcolare la quantità stechiometrica di aria sia in termini di massa che di volume. In particolare:

$$kg_{ARIA}/kg_{(CH_4)} = 4.31 \times kg_{(O_2)}/kg_{(CH_4)} = 4.31 \times 4 = 17.24 \quad (1.7)$$

$$Nm^3_{ARIA}/Nm^3_{(CH_4)} = 4.76 \times Nm^3_{(O_2)}/Nm^3_{(CH_4)} = 4.76 \times 2 = 9.52 \quad (1.8)$$

Dividendo membro a membro la (1.7) per la (1.8) si ottiene:

$$\frac{kg_{ARIA}}{kg_{(CH_4)}} \times \left(\frac{Nm^3_{(CH_4)}}{Nm^3_{ARIA}} \right) = \frac{\rho_{ARIA}}{\rho_{(CH_4)}} = 1.81 \quad (1.9)$$

E' noto che $\rho_{ARIA}(T=300\text{ K})=1.29\text{ kg/Nm}^3$, pertanto $\rho_{(CH_4)}=1.29/1.81=0.71\text{ kg/Nm}^3$

1.3. Combustibili aventi una data percentuale di zolfo

Esistono combustibili caratterizzati dalla presenza di percentuali di zolfo, come ad esempio gli oli densi adoperati per motori marini di grossa taglia. In tal caso, nota la percentuale di S e il rapporto C/H è possibile risalire sia alle percentuali di C ed H sia alla quantità stochiometrica di aria necessaria per kg di combustibile. Si supponga ad esempio che $\%S = 3$ e $C/H = 6.5$. La somma delle percentuali di C , H ed S costituisce l'intera composizione del combustibile, pertanto:

$$C+H+S=100$$

Con i valori di $\%S$ e C/H assegnati si ricava facilmente che:

$$\%C = 84.07$$

$$\%H = 12.93$$

Il calcolo della quantità stochiometrica d'aria per questo combustibile è comunque calcolabile con una formula analoga alla (1.5), con la differenza che bisogna aggiungere anche il "peso" dello zolfo all'interno della media. Più precisamente si ha:

$$\frac{kg_{(O_2)}}{kg_{FUEL}} = (kg_{(O_2)}/kg_S) \left(\frac{S}{(H+C+S)} \right) + (kg_{(O_2)}/kg_C) \left(\frac{C}{(C+H+S)} \right) + (kg_{(O_2)}/kg_{(H_2)}) \left(\frac{H}{(C+H+S)} \right)$$

Sostituendo i valori del nostro problema si ottiene:

$$\frac{kg_{(O_2)}}{kg_{FUEL}} = 1 \times \left(\frac{3}{100} \right) + 2.667 \times \left(\frac{84.07}{100} \right) + 8 \times \left(\frac{12.93}{100} \right) = 12.45$$

1.4. Rapporto reale ARIA-COMBUSTIBILE

Fino ad ora sono state ricavate le quantità stochiometriche di aria necessarie alla combustione di un combustibile avente una assegnata composizione. Tuttavia nella realtà ingegneristica i processi di combustione avvengono molto di rado con miscele dosate in maniera perfettamente stochiometrica; questo è dovuto al fatto che una combustione completa non dipende solo dal dosaggio delle quantità di aria e combustibile ma da molti altri fattori, quali la geometria della camera di combustione, i tempi a disposizione per la formazione della miscela ecc. Pertanto molti impianti termici basati su processi di combustione lavorano con miscele in cui la quantità d'aria è superiore a quella stochiometrica; in questo modo si consente alle molecole di combustibile di "incontrare" con maggiore probabilità quelle d'aria, in modo da scongiurare il rischio che parti di combustibile rimangano incombusti. Questa quantità d'aria aggiuntiva va sotto il nome di eccesso d'aria. L'entità dell'eccesso d'aria dipende dal tipo di combustibile, in particolare man mano che si passa da combustibili gassosi a combustibili solidi, l'eccesso d'aria aumenta. Più precisamente per combustibili gassosi gli eccessi d'aria sono dell'ordine del 4%, per quelli liquidi del 10% per quelli solidi del 15% e più. Il rapporto reale aria combustibile è espresso formalmente come segue:

$$\alpha_R = kg_{(ARIA\ REALE)}/kg_{FUEL}^2 \quad (1.10)$$

Pertanto ricordando l'espressione di α_{ST} , l'eccesso d'aria (e) è esprimibile come segue:

2 Generalmente α è espresso in termini di masse, tuttavia è possibile definire un rapporto stochiometrico aria combustibile con i volumi, come già visto nei precedenti paragrafi.

$$e = \frac{(\alpha_R - \alpha_{ST})}{\alpha_{ST}} = \frac{\alpha_R}{\alpha_{ST}} - 1 \quad (1.11)$$

Il rapporto $\frac{\alpha_R}{\alpha_{ST}}$ prende il nome di *indice d'aria* e si indica con λ . E' possibile dunque riscrivere la (1.11) come:

$$e = \lambda - 1$$

ESERCIZI

- 1. Si calcoli il valore di $\alpha_{STECHIOMETRICO}$ per un Syngas, sapendo che la sua composizione in volume è la seguente:**

$$\begin{aligned} \%CO &= 70 \% \\ \%H_2 &= 30 \% \end{aligned}$$

Esprimere il risultato sia in massa che in volume.

- 2. Si vogliono produrre 300 MW termici con un combustibile avente $H_i = 10000$ kcal/kg. Calcolare la quantità di combustibile necessaria e la quantità stechiometrica di aria di combustione. Esprimere i risultati sia in massa che i volume. Si assuma un valore di α_{ST} pari a 14,25**