

# Calculul procesului de ardere

(note de curs)

## Cuprins

<b>Cuprins .....</b>	<b>2</b>
1.1 Generalitati .....	3
1.2 Calculul aerului necesar arderii.....	5
1.2.1 Combustibili solizi și lichizi.....	5
1.2.2 Combustibili gazoși .....	8
1.3 Calculul gazelor de ardere rezultate în urma arderii .....	9
1.3.1 Combustibili solizi și lichizi.....	9
1.3.2 Combustibili gazoși .....	10

## 1.1 Generalitati

Calculul procesului de ardere presupune determinarea cantității minime de aer necesar precum și determinarea volumului de gaze rezultat în urma arderii.

Spațiul în care se desfășoară arderea este denumit focar. În acest spațiu sunt introduse cele două elemente care se întâlnesc obligatoriu în orice proces de ardere și anume combustibilul și oxidantul (aer, oxigen). De regulă, în procesele de ardere uzuale în tehnică, aerul este cel mai întâlnit oxidant. Mai rar, de exemplu, uneori în metalurgie, se utilizează oxigen tehnic, având o puritate foarte ridicată.

În urma arderii rezultă gaze de ardere, având o compoziție care diferă în funcție de tipul combustibilului și al oxidantului, cenușa sau zgura, datorită balastului conținut de combustibil și bineînțeles, o importantă cantitate de căldură, care depinde de condițiile în care se desfășoară arderea și de cantitatea de aer introdusă în sistem.

Pentru oxidarea completă a elementelor combustibile, deci pentru ca arderea să fie completă, este necesară o cantitate minimă de oxigen ( $O_{2min}$ ), conținută într-o cantitate minimă de aer ( $L_{min}$ ). Arderea desfășurată în prezența aerului minim necesar arderii, poartă denumirea de ardere stoechiometrică, sau ardere teoretică.

Gazele de ardere, obținute în urma arderii, conțin în principal:

- dioxid de carbon ( $CO_2$ ),
- azot ( $N_2$ ),
- apă ( $H_2O$ ),
- monoxid de carbon ( $CO$ ),
- dioxid de sulf ( $SO_2$ ),
- funingine - în cazul utilizării combustibililor solizi sau lichizi, în gazele de ardere se poate întâlni și funingine - care de fapt reprezintă particule neare de carbon.

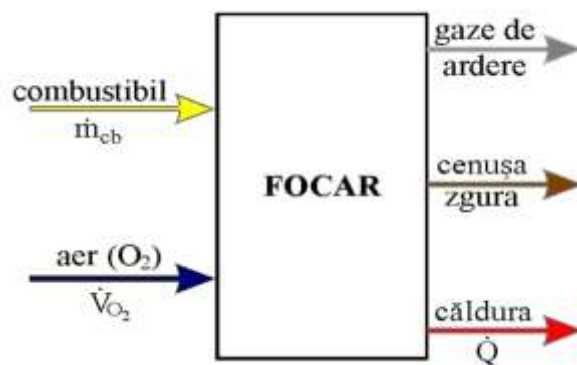


Fig. 1 Schema bloc instalație ardere

Dacă produsele arderii (gaze sau cenușă), nu conțin elemente chimice care ar putea să fie oxidate în continuare, producând cantități suplimentare de căldură, (de exemplu, funingine sau CO), atunci arderea este denumită perfectă, sau teoretică. În caz contrar, arderea este denumită:

- incompletă mecanic, atunci când gazele de ardere conțin particule mecanice combustibile (C),
- incompletă chimic, atunci când gazele de ardere conțin gaze combustibile (de exemplu, CO).

Calculul procesului de ardere se efectuează pe baza reacțiilor chimice de ardere a elementelor combustibile și are ca scop:

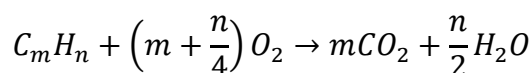
- determinarea căldurii rezultate,
- determinarea cantității de aer necesar desfășurării acestor reacții,
- determinarea volumului de gaze rezultate în urma arderii.

Aceste aspecte sunt foarte importante deoarece, de exemplu, dacă nu se asigură o cantitate suficientă de aer, arderea va fi incompletă, iar dacă se introduce prea mult aer, se diminuează temperatura de ardere, pentru că aerul în exces trebuie încălzit și în plus crește cantitatea de gaze de ardere rezultate.

Cunoașterea cantității de gaze de ardere obținute este esențială pentru a se putea dimensiona tubulatura pentru evacuarea acestora, precum și coșul de fum.

Oxidarea completă a unei hidrocarburi simple duce la formarea de dioxid de carbon (CO<sub>2</sub>) din tot carbonul prezent și apă (H<sub>2</sub>O) din tot hidrogenul prezent.

Pentru un combustibil de tip hidrocarbură, cu compoziția de forma C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> relația de oxidare simplificată poate fi scrisă sub forma:



Chiar și în cazul arderii stoichiometrice, dacă se dorește să se cuantifice toate speciile care participă în procesul de combustie, aceasta presupune mai mult decât măsurarea cantităților de CO<sub>2</sub> și H<sub>2</sub>O.

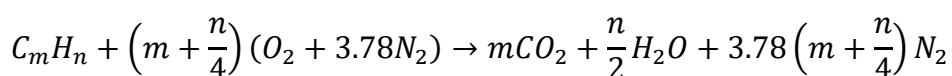
Din moment ce combustibilii sunt arși mai degrabă în aer decât cu oxigen pur, azotul din aer poate participa în procesul de ardere producând oxizi de azot. De asemenea, majoritatea combustibililor conțin și alte elemente pe lângă carbon și hidrogen, acestea putându-se transforma în timpul reacției de ardere în alți compuși.

Și nu în cele din urmă, putem afirma că procesul de ardere nu este unul complet, în gazele de ardere găsim de fiecare dată cantități de combustibil nears și produși de ardere intermediari pe lângă  $\text{CO}_2$  și  $\text{H}_2\text{O}$ .

Aerul este compus din oxigen, azot, precum și alte gaze, în cantități mici, ca dioxidul de carbon, argonul și alte gaze. Din moment ce azotul reprezintă marea majoritate a gazelor pe lângă oxigen, pentru calcule mai precise se poate considera aerul ca fiind format dintr-un amestec de 20.9% oxigen și 79.1% azot, iar pentru calcule rapide 21% oxigen și 79% azot.

Astfel, pentru fiecare mol de oxigen necesar în procesul de combustie, trebuie introduși încă 3.78 moli de azot. Deși azotul nu alterează oxigenul, totuși are un impact major din punct de vedere termodinamic, chimic, cinetic și al formării de poluanți în sistemele de ardere. Acesta este motivul pentru care se recomandă scrierea ecuațiilor arderii avându-se în vedere și speciile inerte.

În acest caz, reacția de ardere stoichiometrică pentru un combustibil de tip hidrocarbură, cu compoziția de forma  $\text{C}_m\text{H}_n$  poate fi scrisă sub forma:



Astfel, pentru fiecare mol de combustibil oxidat, este necesară o cantitate de aer egală cu:

$$4.78 \left(m + \frac{n}{4}\right) \text{moli.}$$

În urma procesului de ardere vor rezulta:

$$m + \frac{n}{2} + 3.78 \left(m + \frac{n}{4}\right) = 4.78m + 1.445n$$

moli de produși de ardere.

$$\text{Raportul molar } \frac{\text{moli combustibil}}{\text{moli aer}} = \frac{1}{4.78 \left(m + \frac{n}{4}\right)}$$

## 1.2 Calculul aerului necesar arderii

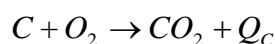
### 1.2.1 Combustibili solizi și lichizi

Combustibilii lichizi și solizi sunt caracterizați prin compoziția chimică elementară oferită în procente gravimetrice.

Pentru determinarea componentelor procesului de ardere se pleacă de la ecuațiile stoichiometrice de reacție ale componentelor combustibile.

Pentru fiecare element combustibil, trebuie scrisă ecuația procesului de oxidare.

Astfel, arderea carbonului:

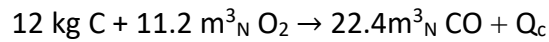
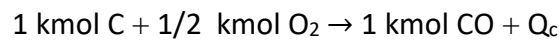
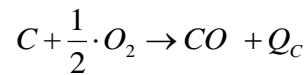


$$1 \text{ kmol C} + 1 \text{ kmol O}_2 \rightarrow 1 \text{ kmol CO}_2 + 405800 \text{ kJ}$$

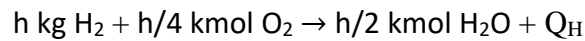
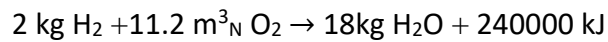
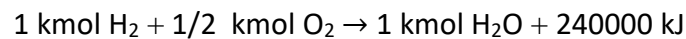
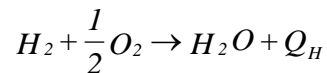
$$12 \text{ kg C} + 22.4 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ O}_2 \rightarrow 22.4 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CO}_2 + 405800 \text{ kJ}$$

$$c \text{ kg C} + c/12 \text{ kmol O}_2 \rightarrow c/12 \text{ kmol CO}_2 + Q_c$$

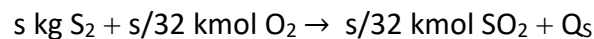
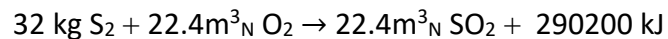
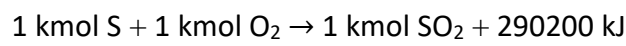
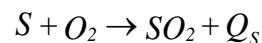
Dacă arderea carbonului este incompletă se obține ca produs de ardere oxidul de carbon (CO).



Arderea hidrogenului în combustibilii solizi sau lichizi:



Arderea sulfurului:



Un combustibil solid sau lichid are următoarea compoziție generală:

$$C + H + O + N + S_c + A + W_t = 100 \%$$

$$c = C / 100 \text{ [kg C/kg cb]}$$

$$o = O / 100 \text{ [kg O}_2\text{/kg cb]}$$

$$h = H / 100 \text{ [kg H}_2\text{/kg cb]}$$

$$n = N / 100 \text{ [kg N}_2\text{/kg cb]}$$

$$s_c = S_c / 100 \text{ [kg S}_c\text{/kg cb]}$$

$$a = A / 100 \text{ [kg A/kg cb]}$$

$$w = W / 100 \text{ [kg W/kg cb]}$$

Volumul minim de oxigen necesar arderii complete a unității de cantitate de combustibil, este denumit oxigenul minim necesar arderii ( $O_{\min}$ ).

Această mărime se poate calcula prin însumarea oxigenului ce intră în ecuațiile de mai sus de oxidare a elementelor combustibile, ținând cont în același timp și de conținutul de oxigen pe care combustibilul îl conține:

$$O_{\min} = \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) \left[ \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kgcb}} \right]$$

Se observă că dacă în compoziția combustibilului există deja oxigen, având participația masică  $o$ , acesta nu va mai trebui să fie introdus din exterior, în focar.

Ținând cont de faptul că volumul unui kmol de gaz este de  $22.414 \text{ m}^3$ , relația anterioară poate să fie scrisă și sub următoarea formă, care este cea utilizată în practică:

$$O_{\min} = 22,414 \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) \left[ \frac{\text{m}_N^3 O_2}{\text{kgcb}} \right]$$

Considerând că oxigenul minim necesar arderii este asigurat din aerul atmosferic și că aerul este uscat, deci nu conține umiditate, deoarece participația volumică a oxigenului în aer este de 21%, se poate calcula cantitatea minimă de aer necesară arderii, denumită și *aerul minim necesar arderii* ( $L_{\min}$ ), cu relația următoare:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} \left[ \frac{\text{m}_N^3 \text{ aer uscat}}{\text{kg cb}} \right]$$

Ținând cont de faptul că aerul este umed și are umiditatea  $x$  [kg umiditate/kg aer uscat], atunci, notând densitatea aerului uscat la starea normală fizică cu  $\rho_{\text{Naer}}$  și densitatea umidității la starea normală fizică cu  $\rho_{\text{Num}}$ , aerul minim necesar arderii se calculează cu relația următoare:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} \left( 1 + x \frac{\rho_{\text{Naer}}}{\rho_{\text{Num}}} \right) = \frac{O_{\min}}{0,21} (1 + 1,61x) \left[ \frac{\text{m}_N^3 \text{ aerum}}{\text{kgcb}} \right]$$

Densitatea aerului calculată în condiții normale are valoarea de  $1.293 \text{ kg/m}^3_N$ , iar volumul specific calculat pentru vaporii de apă în condiții normale fizice  $0.803 \text{ m}^3_N/\text{kg}$ .

Arderea nu ar putea să fie completă în condițiile asigurării oxigenului, respectiv aerului minim necesar, decât dacă amestecul dintre combustibil și aer, respectiv oxigen, ar fi perfect, astfel încât fiecare moleculă de element combustibil să ajungă în contact cu numărul necesar de molecule de oxigen, pentru a putea fi oxidată.

În realitate, acest amestec perfect este imposibil de realizat și în consecință, pentru a nu rămâne particule combustibile nearese (ceea ce doar teoretic este posibil), respectiv pentru ca numărul acestora să fie cât mai mic, se va asigura o cantitate de aer, deci și de oxigen, mai mare decât cea minimă necesară arderii.

Cantitatea de aer introdusă în mod real în procesul de ardere, denumită și aerul real de ardere ( $L$ ), poate fi determinată utilizând coeficientul excesului de aer, sau mai simplu excesul de aer ( $\lambda$ ), definit prin relația:

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}}$$

Valoarea excesului de aer este recomandată în literatura de specialitate, pentru fiecare tip de combustibil în funcție și de particularitățile procesului de ardere, astfel:

- Pentru combustibili solizi sub formă de praf:  $\lambda = 1,1...1,4$ .
- Pentru combustibili solizi în strat fluidizat:  $\lambda = 1,3...2$ .
- Pentru combustibili lichizi:  $\lambda = 1,05...1,4$ .

Pentru arderea în motoare cu aprindere prin scânteie, dacă se dorește randament termic maxim, se recomandă un amestec sărac.

$$\lambda = 1,05 \dots 1,01,$$

Pentru arderea în motoare cu aprindere prin compresie:

$$\lambda = 1,3 \dots 1,7.$$

Dacă este cunoscută cantitatea de combustibil care trebuie arsă,  $m_{cb}$ , atunci aerul necesar se calculează cu relația:

$$V_{aer} = m_{cb} \cdot \lambda \cdot L_{min} \left[ m_N^3 \text{ aer} \right]$$

Dacă se cunoaște debitul de combustibil  $\dot{m}_{cb}$  [kg/s], se poate determina debitul necesar de aer:

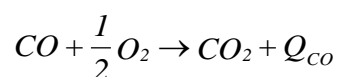
$$\dot{V}_{aer} = \dot{m}_{cb} \cdot \lambda \cdot L_{min} \left[ m_N^3 \text{ aer} / s \right]$$

### 1.2.2 Combustibili gazoși

Compoziția combustibililor gazoși este dată în procente volumetrice, în consecință, calculul procesului de ardere se face ținând seama de acest aspect.

Si în acest caz se pornește de la ecuațiile de ardere.

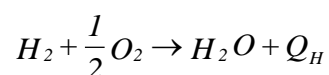
Arderea monoxidului de carbon:



$$1 \text{ kmol CO} + 0,5 \text{ kmol O}_2 \rightarrow 1 \text{ kmol CO}_2 + 283700 \text{ kJ}$$

$$(co) m_N^3 \text{ CO} + 0,5 (co) m_N^3 \text{ O}_2 \rightarrow (co) m_N^3 \text{ CO}_2 + Q_{CO}$$

Arderea hidrogenului în combustibilii gazoși se calculează tot pe baza relației:

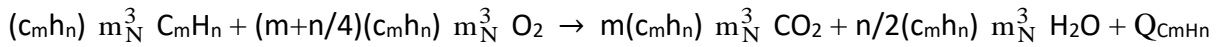
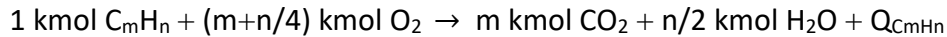
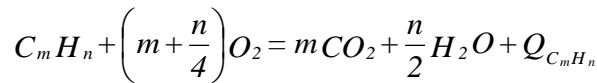


$$1 \text{ kmol H}_2 + 0,5 \text{ kmol O}_2 \rightarrow 1 \text{ kmol H}_2\text{O} + 240000 \text{ kJ}$$

$$(h_2) m_N^3 \text{ H}_2 + 0,5 (h_2) m_N^3 \text{ O}_2 \rightarrow (h_2) m_N^3 \text{ H}_2\text{O} + Q_H.$$

Arderea unei hidrocarburi ( $C_mH_n$ ):





Din reacțiile de ardere ale elementelor combustibile gazoase, se poate calcula oxigenul minim necesar arderii:

$$O_{\min} = 0,5[(h_2) + (co)] + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right) (c_m h_n) - (o_2) \left[ \frac{m_N^3 O_2}{m_N^3 cb} \right]$$

Relațiile privind calculul aerului minim necesar arderii, aerul real și excesul de aer, din cadrul combustibililor solizi și lichizi sunt valabile și pentru combustibilii gazoși.

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} \left[ \frac{m_N^3 \text{ aer uscat}}{m_N^3 cb} \right]$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} \left( 1 + x \frac{\rho_{Naer}}{\rho_{Num}} \right) = \frac{O_{\min}}{0,21} (1 + 1,61x) \left[ \frac{m_N^3 \text{ aerum}}{m_N^3 cb} \right]$$

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}}$$

Pentru combustibilii gazoși se recomandă:  $\lambda = 1.05 \dots 1.3$ .

$$V_{aer} = V_{cb} \cdot \lambda \cdot L_{\min} \left[ m_N^3 \text{ aer} \right]$$

Dacă se cunoaște debitul de combustibil  $\dot{V}_{cb}$  [ $m_N^3/s$ ], se poate determina debitul necesar de aer:

$$\dot{V}_{aer} = \dot{V}_{cb} \cdot \lambda \cdot L_{\min} \left[ m_N^3 \text{ aer} / s \right]$$

## 1.3 Calculul gazelor de ardere rezultate în urma arderii

### 1.3.1 Combustibili solizi și lichizi

Dacă arderea se desfășoară în condiții stoechiometrice, adică utilizând aerul minim necesar arderii ( $\lambda = 1$ ), atunci se va obține și volumul minim de gaze de ardere, cu relația:

$$V_g^{\min} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} \left[ \frac{m_N^3}{kgcb} \right]$$

Volumele parțiale ale fiecărui element în parte, din compoziția gazelor de ardere, se calculează conform ecuațiilor de bază ale arderii.

pentru  $CO_2$ :

$$V_{CO_2} = \frac{c}{12} \text{ kmol } CO_2 = \frac{22,414}{12} c = 1,867c \left[ \frac{m_N^3}{kgcb} \right]$$

pentru H<sub>2</sub>O:

$$V_{H_2O} = 22,414 \left( \frac{h}{2} + \frac{w}{18} \right) + 1,61x \left[ \frac{m_N^3}{kgcb} \right]$$

Pentru cazul în care aerul care întreține arderea este perfect uscat, volumul parțial de H<sub>2</sub>O se calculează cu relația:

$$V_{H_2O} = 22,414 \left( \frac{h}{2} + \frac{w}{18} \right) \left[ \frac{m_N^3}{kgcb} \right]$$

pentru SO<sub>2</sub>:

$$V_{SO_2} = \frac{22,414}{32} s = 0,7s \left[ \frac{m_N^3}{kgcb} \right]$$

Volumul de azot, V<sub>N<sub>2</sub></sub> conținut de aerul minim necesar arderii se calculează ținând seama de participația volumică a azotului în aerul uscat:

$$V_{N_2} = 0,79L_{\min} \left[ \frac{m_N^3}{kgcb} \right]$$

Dacă arderea se desfășoară cu exces de aer, volumul total al gazelor de ardere este:

$$V_g^t = V_g^{\min} + V_{aer}^{exces} = V_g^{\min} + (\lambda - 1)L_{\min} \left[ \frac{m_N^3}{kgcb} \right]$$

Volumul de gaze uscate se obține scăzând din volumul total, volumul vaporilor de apă:

$$V_g^{us} = V_g^t - V_{H_2O} \left[ \frac{m_N^3}{kgcb} \right]$$

acesta este foarte important în controlul arderii, pentru că experimental (cu ajutorul analizoarelor de gaze) se poate determina doar compoziția gazelor uscate, întrucât vaporii de apă prezenți în gazele de ardere condensează în sonda de prelevare a probelor.

### 1.3.2 Combustibili gazoși

În cazul arderii stoichiometrice, cu aerul minim necesar ( $\lambda = 1$ ), volumul de gaze de ardere, care în această situație este minim, se calculează cu relația:

$$V_g^{\min} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \left[ \frac{m_N^3}{m_N^3 cb} \right]$$

Fiecare volum parțial în parte se poate calcula astfel:

pentru CO<sub>2</sub>:

$$V_{CO_2} = (co) + \sum m(c_m h_n) + (co_2)$$

unde (co<sub>2</sub>) reprezintă participația volumică a dioxidului de carbon din compoziția inițială a combustibilului gazos.

pentru H<sub>2</sub>O:

$$V_{H_2O} = (h_2) + \sum \frac{n}{2} (c_m h_n) + (w)$$

unde (w) reprezintă umiditatea inițială a combustibilului.

pentru V<sub>N<sub>2</sub></sub> se utilizează relația:

$$V_{N_2} = 0,79L_{\min} \left[ \frac{m_N^3}{m_N^3 cb} \right].$$

Dacă arderea se realizează cu exces de aer ( $\lambda > 1$ ), atunci volumul de gaze de ardere se poate calcula cu relațiile:

$$V_g^t = V_g^{\min} + V_{aer}^{exces} = V_g^{\min} + (\lambda - 1)L_{\min} \left[ \frac{m_N^3}{m_N^3 cb} \right]$$

$$V_g^{us} = V_g^t - V_{H_2O} \left[ \frac{m_N^3}{m_N^3 cb} \right]$$