

Capitolul 7

PROCESE DE ARDERE

La baza studiului termodinamic al proceselor de ardere stau cele trei principii ale termodinamicii:

- Principiul I, care serveşte la stabilirea bilanţului termic al arderii şi la determinarea cantităţilor de oxigen şi gaze de ardere şi a căldurii de ardere.

- Principiul II, care serveşte la precizarea sensului de desfăşurare a procesului şi la determinarea pierderilor de energie. Arderea este un proces ireversibil, cu creştere de entropie.

- Principiul III, care serveşte la stabilirea scării de disociere a produselor rezultate în urma arderii.

Combustibili sunt substanţe, în general de provenienţă organică, care prin ardere, în prezenţa oxigenului, dezvoltă căldură şi care pot fi folosite drept surse de energie termică. În compoziţia combustibililor intră elemente chimice combustibile (carbonul C , hidrogenul H , sulful S) şi compuşi ai acestora (hidrocarburile $C_m H_n$, acetilena $C_2 H_2$, hidrogenul sulfurat $H_2 S$), precum şi elemente necombustibile (azotul N , oxigenul O , apa W şi cenuşa A , care reprezintă totalitatea materiilor minerale solide rezidente în compoziţia combustibilului la temperaturi mai mari de 800°C).

Combustibilii se clasifică după starea lor de agregare în combustibili solizi, lichizi şi gazoşi. La rândul lor, aceştia pot fi combustibili naturali, artificiali şi sintetici.

Combustibilii solizi naturali au în compoziția lor carbon, hidrogen, sulf, azot, oxigen, apă și cenușă. Exemple: lemnul, cărbunii minerali: turba, huila, antracitul, mangalul.

Combustibilii lichizi prezintă avantaje mari în ceea ce privește transportul, depozitarea și arderea lor. Cei mai utilizați sunt păcura, combustibilul lichid ușor (de calorifer), motorina și benzina. Păcura este un amestec de hidrocarburi grele care rezultă în urma fracționării țițeiului și a separării hidrocarburilor ușoare (motorina și benzina). Combustibilul lichid ușor se obține prin diluarea păcurii și a reziduurilor obținute la distilarea țițeiului.

Combustibilii gazoși pot fi naturali (gaze naturale de zăcământ, cu un conținut de metan de peste 98%) sau artificiali, obținuți în urma unor procese chimice și tehnologice.

Arderea combustibililor reprezintă o reacție chimică exotermă de oxidare violentă prin care elementele combustibile se combină rapid cu oxigenul iar căldura dezvoltată este preluată de produsele de ardere (gazele de ardere și cenușa).

Spațiul special amenajat în care are loc arderea combustibililor se numește **cameră de ardere** sau **focar**.

Flacăra reprezintă zona incandescentă, mai mult sau mai puțin luminoasă, care se datorează în principal arderii substanțelor volatile conținute în combustibili. Anumiți combustibili solizi (ex. antracitul, mangalul) ard fără flacăra datorită conținutului redus în substanțe volatile.

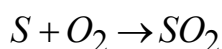
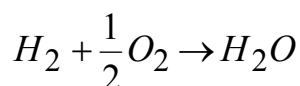
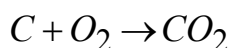
Pentru declanșarea procesului de ardere, combustibilul trebuie să ajungă la o anumită temperatură denumită **temperatură de aprindere**, și care are valori cuprinse între 185°C pentru hârtia de ziar și 800°C pentru carbon pur.

În funcție de viteza de propagare a frontului de ardere, procesele de ardere se împart în:

- deflagrație, pentru $w < 30$ m/s
- detonație, pentru $30 \text{ m/s} \leq w \leq 200$ m/s
- explozie, pentru $w > 200$ m/s

În termodinamica proceselor industriale se studiază numai procesele de ardere lentă, și anume deflagrația.

Bilanțul material al arderii combustibililor solizi și lichizi, în cazul unei arderi complete, are la bază reacțiile chimice molare ale elementelor combustibile:



Bilanțul de substanță corespunzător reacțiilor chimice molare va fi:

$$1 \text{ kmol}_C + 1 \text{ kmol}_{O_2} = 1 \text{ kmol}_{CO_2}$$

$$1 \text{ kmol}_{H_2} + \frac{1}{2} \text{ kmol}_{O_2} = 1 \text{ kmol}_{H_2O}$$

$$1 \text{ kmol}_S + 1 \text{ kmol}_{O_2} = 1 \text{ kmol}_{SO_2}$$

sau, transformat în bilanț de masă:

$$12 \text{ kg}_C + 32 \text{ kg}_{O_2} = 44 \text{ kg}_{CO_2}$$

$$2 \text{ kg}_{H_2} + 16 \text{ kg}_{O_2} = 18 \text{ kg}_{H_2O}$$

$$32 \text{ kg}_S + 32 \text{ kg}_{O_2} = 64 \text{ kg}_{SO_2}$$

Notând cu g_i participațiile masice ale elementelor combustibile componente ale unui combustibil solid sau lichid, putem scrie ecuațiile de ardere corespunzătoare unui kilogram de combustibil:

$$g_C + \frac{32 \text{ kg } O_2}{12 \text{ kg } C} g_C = \frac{44 \text{ kg } CO_2}{12 \text{ kg } C} g_C$$

$$g_H + \frac{16 \text{ kg } O_2}{2 \text{ kg } H_2} g_H = \frac{18 \text{ kg } H_2O}{2 \text{ kg } H_2} g_H$$

$$g_S + \frac{32 \text{ kg } O_2}{32 \text{ kg } S} g_S = \frac{64 \text{ kg } SO_2}{32 \text{ kg } S} g_S$$

Cantitatea minimă de oxigen necesară arderii unui kilogram de combustibil rezultă din însumarea cantităților de oxigen necesare pentru fiecare fracțiune de element combustibil component:

$$m_{O_2, \min} = \frac{8}{3} g_C + 8 g_H + g_S - g_O \quad [\text{kg/kg}_{\text{comb}}]$$

Remarcă: Oxigenul din combustibil, g_O participă la procesul de ardere diminuând aportul de oxigen necesar arderii.

Cantitatea minimă de oxigen, exprimată în metri cubi normali, se calculează cu ajutorul densității oxigenului în condiții normale fizice ($p_o = 101.325 \text{ Pa}$ și $t_o = 0^\circ\text{C}$):

$$\rho_{oO_2} = \frac{M_{O_2}}{V_o} = \frac{32}{22,414} = 1,428 \text{ kg/m}^3_N$$

$$V_{oO_2, \min} = \frac{m_{O_2, \min}}{\rho_{oO_2}} = \frac{m_{O_2, \min}}{1,428} \quad [\text{m}^3_N/\text{kg}_{\text{comb}}]$$

În general, oxigenul necesar arderii este preluat din aerul atmosferic, în care oxigenul are o participație masică de 23,2%. Astfel, cantitatea minimă de aer necesară arderii unui kilogram de combustibil va fi:

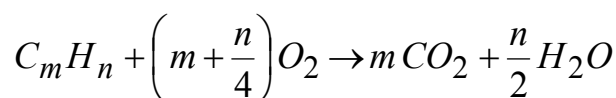
$$L_{\min} = \frac{m_{O_2, \min}}{0,232} \quad [\text{kg/kg}_{\text{comb}}]$$

În vederea asigurării unei arderi complete, se introduce o cantitate mai mare de aer :

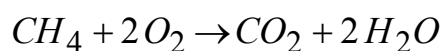
$$L = \alpha L_{\min} \quad [\text{kg/kg}_{\text{comb}}]$$

unde α reprezintă *coeficientul de exces de aer* având valori, în funcție de compoziția combustibilului și de tipul camerei de ardere, cuprinse între 1,3 și 2 pentru combustibili solizi și între 1,2 și 1,4 pentru cei lichizi. În cazul motoarelor cu ardere internă functionând cu benzină, coeficientul de exces de aer are valori cuprinse între 0,85 și 1,05.

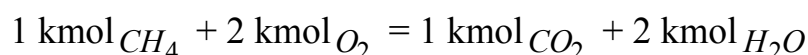
Bilanțul material al arderii combustibililor gazoși este analizat pentru cei mai utilizați combustibili gazoși, și anume hidrocarburile ($C_m H_n$), pentru care reacția chimică molară se scrie în formă generală după cum urmează:



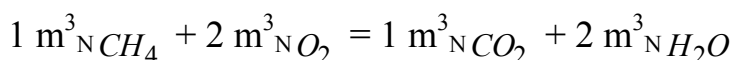
În cazul metanului (CH_4), ecuația devine:



Bilanțul de substanță corespunzător va fi:



sau pentru un metru cub normal de metan:



Cantitatea minimă de oxigen necesară arderii unui metru cub normal de metan va fi:

$$V_{O_2, \min} = 2 \text{ m}^3_N / \text{m}^3_N CH_4$$

Având în vedere că participația volumică a oxigenului în aerul atmosferic este de 20,9%, cantitatea minimă de aer necesară arderii unui metru cub normal de metan va fi:

$$L_{\min} = \frac{V_{O_2, \min}}{0,209} = 9,57 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}\text{CH}_4$$

Ca și în cazul combustibililor solizi și lichizi, pentru asigurarea unei arderi complete, se introduce o cantitate mai mare de aer :

$$L = \alpha L_{\min} \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}\text{CH}_4]$$

unde coeficientul de exces de aer α are valori cuprinse între 1,05 și 1,1 iar în cazul turbinelor cu gaze între 3 și 6.

Cantitatea de gaze de ardere rezultată în urma arderii teoretice a unui metru cub normal de metan va fi:

$$V_{ogo} = 3 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}\text{CH}_4$$

Dacă pentru ardere se folosește aerul atmosferic, atunci în compoziția gazelor de ardere va apărea și azotul și excesul de oxigen care nu au participat la procesul de ardere:

$$V_{og} = 3 + 0,791L + 0,209(\alpha - 1)L \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}\text{CH}_4]$$

Cantitatea de gaze de ardere uscate se calculează eliminând din cantitatea totală de gaze de ardere, cantitatea de vapori de apă:

$$V_{ogu} = V_{og} - V_{oH_2O} = 1 + 0,791L + 0,209(\alpha - 1)L \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}\text{CH}_4]$$

Remarcă: În cazul în care avem un amestec de gaze combustibile, cantitățile minime de oxigen, de aer și de gaze de ardere se calculează ținând cont de participațiile volumice ale gazelor combustibile componente.

Căldura de reacție reprezintă energia chimică a combustibililor, aflată în stare latentă, care, în urma reacțiilor chimice de oxidare (a arderii), se transformă în căldură preluată de gazele de ardere. Căldura de reacție, denumită și efectul termic al arderii, se determină din bilanțul termic al camerei de ardere, în următoarele ipoteze simplificatoare:

- energia cinetică și potențială se neglijează în raport cu variația de entalpie;

- în timpul reacției de ardere nu se produce și nu se consumă lucru mecanic;
- combustibilul și aerul necesar arderii au temperaturi egale.

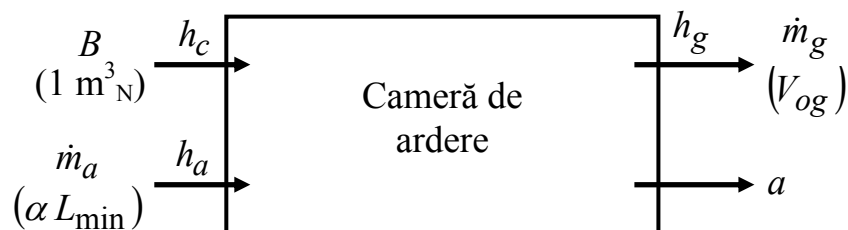


Fig. 7.1: Bilanțul camerei de ardere

În cazul arderii combustibililor gazoși nu există cenușă, $a = 0$ și deci bilanțul cantității de substanță se scrie astfel:

$$1 + \alpha L_{\text{min}} = V_{og}$$

Fluxul căldurii de reacție rezultă din bilanțul termic scris sub formă de fluxuri:

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_g h_g - (B h_c + \dot{m}_a h_a) \quad [\text{W}]$$

În condiții de ardere izobară și în ipoteza răcirii gazelor de ardere până la temperatura de introducere a aerului și a combustibilului în camera de ardere, căldura de reacție corespunzătoare arderii unui metru cub normal de combustibil gazos poartă denumirea de **putere calorică** sau **calorifică** a combustibilului.

$$q_r = V_{og} h_g - (h_c + \alpha L_{\text{min}} h_a) \quad [\text{J/m}^3_{\text{N}}]$$

Combustibilii sunt caracterizați de două puteri calorifice, și anume:

- **Puterea calorică inferioară**, notată cu H_i , care reprezintă căldura de reacție corespunzătoare cazului în care apa din produsele de ardere se găsește în stare de vapori.
- **Puterea calorică superioară**, notată cu H_s , care reprezintă căldura de reacție corespunzătoare cazului în care apa din produsele de ardere se găsește în stare condensată (de lichid).

Puterea calorică superioară a combustibililor se determină pe cale experimentală prin metoda calorimetrică iar cea inferioară se obține prin calcul:

$$H_i = H_s - m_w r \quad [\text{J/m}^3_{\text{N}}]$$

unde m_w reprezintă cantitatea de apă din produsele de ardere rezultată în urma arderii unui metru cub normal de combustibil gazos iar r căldura latentă de condensare a apei.

Remarcă: În cazul combustibililor solizi și lichizi, puterile calorifice se exprimă în J/kg.

Pentru caracterizarea eficienței și compararea diferitelor instalații de ardere, s-a introdus noțiunea de **combustibil conventional**, definit ca un combustibil ipotetic (nu există în realitate) având puterea calorică inferioară egală cu 7000 kcal/kg (29.308 kJ/kg).

La temperaturi de peste 1.500°C apare **disocierea** gazelor de ardere (descompunerea moleculelor unor componente în radicali și atomi) având ca efect scăderea entalpiei gazelor de ardere.

Temperatura teoretică de ardere reprezintă temperatura maximă (ideală) la care ar ajunge gazele de ardere dacă camera de ardere ar fi perfect izolată termic (adiabatică, fără pierderi de căldură). Temperatura teoretică de ardere denumită și **temperatura de ardere adiabatică**, se referă la o ardere fără disociere, având coeficientul de exces de aer egal cu unitatea ($\alpha = 1$) și temperaturile combustibilului și aerului egale cu cea a mediului ambiant:

$$t^* = t_{ext} + \frac{H_i}{V_{og} c_{pg}} \quad [^\circ\text{C}]$$

unde t_{ext} este temperatura mediului ambiant în °C, H_i este puterea calorică inferioară a combustibilului în J/kg, V_{og} este volumul total de gaze de ardere rezultat în urma arderii unui kilogram de combustibil în $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{kg}$ și c_{pg} este căldura specifică la presiune constantă a gazelor de ardere în $\text{J/m}^3_{\text{N}} \text{K}$.

În condiții reale de desfășurare a procesului de ardere apar pierderi datorate ireversibilității proceselor, a arderii incomplete și a pierderilor de căldură din camera de ardere și la evacuarea gazelor. Acestea duc la scăderea **temperaturii reale de ardere** sub valoarea celei teoretice:

$$t^* > t = t_{ext} + \frac{\eta_a H_i - \frac{\dot{Q}_p}{B}}{V_{og} c_{pg}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

unde η_a este randamentul arderii, \dot{Q}_p reprezintă fluxul pierderilor de căldură din camera de ardere în W, iar B debitul masic de combustibil în kg/s.

Remarcă: Temperatura de ardere crește odată cu creșterea temperaturii mediului ambiant (a combustibilului și a aerului de ardere). Prin urmare, în multe cazuri, se practică preîncălzirea combustibilului și a aerului necesar arderii, prin recuperarea căldurii gazelor de ardere evacuate cu ajutorul schimbatoarelor de căldură denumite **preîncălzitoare**.

Pe de alta parte, creșterea excesului de aer (și deci a volumului normal de gaze de ardere) conduce la scăderea temperaturii de ardere, ceea ce impune o optimizare a dozajului de aer.