

ARDEREA COMBUSTIBILILOR

Capitol realizat în colaborare cu Prof. em. dr. ing. Teodor Mădărășan

Generalități. Clasificarea combustibililor

Arderea este procesul de oxidare rapidă a unor substanțe, în urma căruia se degajă căldură. Din punct de vedere termodinamic, procesul de ardere este analizat global, în sensul că nu se studiază mecanismul de desfășurare a arderii, denumit cinetica arderii, care este un fenomen chimic extrem de complex și nu se studiază nici produsele intermediare ale arderii.

Combustibilii sunt substanțe care prin ardere, respectiv oxidare, produc o însemnată cantitate de căldură și deci pot să fie utilizate ca *surse economice de căldură*. De exemplu o piesă de mobilier din lemn, chiar dacă prin ardere produce căldură, nu poate fi considerată combustibil, pentru că nu este o sursă economică de căldură, dar în anumite condiții, lemnul în sine poate să fie considerat combustibil.

Prin ardere, energia chimică a combustibililor se transformă în căldură prin reacții exoterme de oxidare (*exoterm* => cu degajare de căldură; *endoterm* => cu absorbție de căldură).

Câteva *condiții* pe care trebuie să le îndeplinească o substanță pentru a fi considerată combustibil sunt următoarele:

- să reacționeze exoterm cu oxigenul, cu viteză mare și la temperaturi ridicate;
- produsele rezultate în urma arderii să nu fie toxice;
- să fie suficient de răspândit în natură, deci să fie ieftin și să nu prezinte alte utilizări posibile, mai economice;
- produsele arderii să nu fie corozive pentru suprafețele cu care intră în contact etc.

În continuare, prin termenul combustibili, sunt desemnați combustibilii fosili clasici: cărbuni, petrol și produsele derivate din acesta, gaze naturale etc.

Clasificarea combustibililor se poate realiza pe de-o parte *după starea de agregare* în combustibili *solizi, lichizi și gazoși*, iar pe de altă parte *după proveniență* în combustibili *naturali și artificiali*. În continuare sunt prezentate câteva exemple:

- combustibili solizi naturali: rumeguș, lemn, cărbune (turbă, huilă, antracit etc.), paie, etc.;
- combustibili solizi artificiali: mangal, cocs, brichete de cărbuni, peleți, etc.;
- combustibili lichizi naturali: țiței;
- combustibili lichizi artificiali: benzină, motorină, petrol, păcură, gaze lichefiate etc.;
- combustibili gazoși naturali: gaz metan, gaz de sondă etc.;
- combustibili gazoși artificiali: gaz de cocserie, gaz de furnal, etc.

Compoziția combustibililor

Compoziția combustibililor poate să fie stabilită global prin desemnarea părții care participă efectiv la procesul de ardere, denumită *masa combustibilă* și a părții care nu participă la ardere, denumită *balast*, care se regăsește între produșii finali ai arderii, sub formă de zgură. Această modalitate de definire a compoziției combustibililor evidențiază în plus și umiditatea, respectiv cantitatea de apă conținută de combustibili și este numită *analiză tehnică*.

Necesități practice legate de calculul procesului de ardere, impun detalierea compoziției celor două componente ale combustibililor, prin *analiza chimică elementară*, sau mai scurt *analiza elementară*, în elemente chimice primare, sau compuși stabili, care alcătuiesc împreună combustibilul. Compoziția chimică elementară, este exprimată pentru combustibilii solizi și lichizi în *participații masice* [kg component / kg combustibil], iar pentru combustibilii gazoși în *participații volumice* [m³N component / m³N combustibil].

Combustibilii solizi și lichizi, au în compoziție ca și elemente chimice combustibile: carbonul (c), hidrogenul (h) și sulful (s). În paranteze, cu litere mici, au fost notate participațiile masice ale elementelor chimice. Dintre aceste elemente, sulful este o prezență nedorită, deoarece reacționează cu umiditatea din combustibil, rezultând acid sulfuric, iar acesta este extrem de coroziv pentru elementele metalice ale instalațiilor de ardere. Alte elemente care participă la procesul de ardere sunt: oxigenul (o) legat, deci existent în combustibil și umiditatea combustibilului (w). Masa inertă, minerală, sau balastul, are participația masică notată prin (a). Suma participațiilor masice evidențiate prin analiza elementară, trebuie să satisfacă relația:

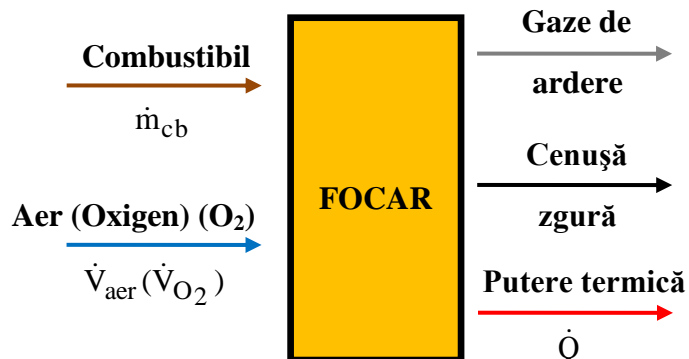
$$c + h + s + o + w + a = 1$$

Combustibilii gazoși au în compoziție ca elemente combustibile: hidrogen (h₂), oxid de carbon (co), diferite hidrocarburi de tipul (c_mh_n) de exemplu metanul (ch₄), iar ca elemente necombustibile: oxigen (o₂), azot (n₂), bioxid de carbon (co₂) și umiditate (w). Între paranteze au fost notate participațiile volumice, care trebuie să satisfacă relația:

$$h_2 + co + \sum c_m h_n + o_2 + n_2 + co_2 + w = 1$$

Procesul de ardere. Căldura de ardere (puterea calorică)

Pentru a analiza procesul de ardere, sistemul termodinamic în care se produce aceasta, este definit ca în schema din figura alăturată și permite introducerea unor noțiuni foarte importante pentru înțelegerea ulterioară a fenomenelor legate de ardere.



Schema sistemului termodinamic în care se produce arderea

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*, adică cea componentă care urmează să ardă, având debitul masic \dot{m}_{cb} și *comburentul*, adică cea componentă care conține oxigenul necesar arderii. De regulă, în procesele de ardere uzuale din tehnică, aerul este cel mai întâlnit comburent. Mai rar, de exemplu uneori în metalurgie, se utilizează ca și comburent, oxigen tehnic, având o puritate foarte ridicată. Debitul volumic de oxigen conținut de aer, este notat cu \dot{V}_{O_2} .

În urma arderii, rezultă:

- *gaze de ardere*, având o compoziție care diferă în funcție de tipul combustibilului și al comburentului,
- *cenușă sau zgură*, datorită balastului conținut de combustibil;
- *putere termică (căldură)*, care reprezintă efectul util și care depinde de condițiile în care se desfășoară arderea și de cantitatea de aer (comburent) introdusă în sistem.

Puterea termică rezultată în urma arderii este notată cu \dot{Q} .

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, poartă denumirea de ardere stoichiometrică, sau ardere teoretică. Stoichiometria este ramura chimiei care studiază raporturile cantitative dintre elemente, în combinații sau în reacții (conform DEX online).

Gazele de ardere, obținute în urma arderii, conțin în principal bioxid de carbon (CO_2), azot (N_2), apă (H_2O), oxid de carbon (CO), bioxid de sulf (SO_2), oxizi de azot (NO_x) etc.

În cazul utilizării combustibililor solizi, în gazele de ardere se întâlnește și funingine, care de fapt reprezintă particulele năse de carbon.

Arderea perfectă, denumită și *arderea teoretică* este caracterizată prin faptul că gazele de ardere nu conțin elemente chimice combustibile (de exemplu funingine sau CO).

Arderea incompletă mecanică, este caracterizată prin faptul că gazele de ardere conțin particule mecanice combustibile (de exemplu C).

Arderea incompletă chimică, este caracterizată prin faptul că gazele de ardere conțin gaze combustibile (de exemplu CO).

Prin ardere, energia chimică a combustibililor este eliberată sub formă de căldură, denumită și căldură de reacție sau *căldură de ardere*. Pentru căldura de reacție sau *căldura de ardere*, se utilizează și denumirea de *putere calorică (H)* a combustibililor. A nu se confunda cu noțiunea de putere termică.

În funcție de valoarea căldurii de reacție (*căldură de ardere, sau putere calorică*) degajate în procesul de ardere, poate să fie evaluată calitatea unui combustibil, iar aceasta reprezintă un criteriu de comparație a combustibililor.

Căldura de ardere (puterea calorică) este căldura de reacție produsă în condițiile stării normale fizice ($p_0=1.013 \text{ bar}$; $t=0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Căldura de ardere (puterea calorică) poate să fie definită mai simplu, ca fiind căldura dezvoltată prin arderea completă a unității de cantitate de combustibil.

Unitatea de măsură a căldurii de ardere (puterii calorice), pentru combustibilii solizi și lichizi, este [kJ/kg], iar pentru combustibilii gazoși este [kJ/m³N].

Ținând seamă că în gazele de ardere există apă (H₂O), provenită din oxidarea hidrogenului sau a hidrocarburilor (C_mH_n), pot să fie definite două tipuri de călduri de ardere (puteri calorice), în funcție de starea de agregare în care se regăsește apa, ca produs final al arderii.

Dacă apa rezultată în urma arderii, se regăsește în gazele de ardere sub formă de vapori, căldura latentă de vaporizare a apei (Q_{vap}) este conținută în gazele de ardere.

Dacă apa rezultată în urma arderii, se regăsește ca produs de ardere sub formă lichidă, căldura căldura de vaporizare a apei (Q_{vap}) este conținută în căldura de reacție.

Căldura de ardere (puterea calorică) superioară (H_s), este căldura de reacție pentru cazul în care aceasta conține căldura de vaporizare a apei (apa reprezintă un produs al arderii, în stare lichidă, iar toate produsele arderii sunt obținute în condițiile de temperatură și presiune corespunzătoare stării normale fizice – starea inițială a combustibilului și comburantului, înainte de arderea propriu-zisă).

Căldura de ardere (puterea calorică) inferioară (H_i), este căldura de reacție pentru cazul în care aceasta nu conține căldura de vaporizare a apei, deoarece aceasta se regăsește în gazele de ardere (apa reprezintă un produs al arderii, în stare de vapori, iar toate produsele arderii sunt obținute în condițiile de temperatură și presiune corespunzătoare desfășurării arderii).

Între cele două tipuri de puteri calorice există relația evidentă:

$$H_i = H_s - Q_{\text{vap}}$$

Pentru combustibili solizi și lichizi se poate scrie:

$$Q_{\text{vap}} = 2510(h + w) \text{ [kJ/kg}_{\text{cb}}]$$

unde h și w sunt participațiile masice ale apei rezultate din arderea hidrogenului, respectiv apei conținute inițial de combustibilul solid, sau lichid.

Pentru combustibilii gazoși se poate scrie:

$$Q_{\text{vap}} = 2510 \left[\frac{n}{2} (c_m h_n) + (h_2) + (w) \right] \left[\text{kJ} / \text{m}^3_{\text{Ncb}} \right]$$

unde $(c_m h_n)$, (h_2) și (w) sunt participațiile volumice ale hidrocarburilor, hidrogenului și umidității combustibilului gazos.

Căldura de ardere (puterea calorică) se poate determina experimental într-o instalație denumită bombă calorimetrică. Determinarea experimentală stabilește căldura de ardere (puterea calorică) reală a combustibilului și constă în încălzirea unei cantități cunoscute de apă, între valori determinate experimental ale temperaturii inițiale și finale, cu ajutorul căldurii rezultate în urma arderii unei cantități cunoscute de combustibil.

Căldura de ardere (puterea calorică) se poate determina prin calcul, cunoscând elementele combustibile componente, căldurile de ardere (puterile calorice) ale acestora și participațiile masice, respectiv volumice ale acestora.

Căldura de ardere (puterea calorică) inferioară a combustibililor solizi și lichizi se calculează cu relația:

$$H_i = \sum_{k=1}^n H_{ik} g_k \quad [\text{kJ/kg}]$$

unde H_{ik} este puterea calorică (căldura de ardere) inferioară a elementului k , g_k este participația masică a elementului k , iar n este numărul de elemente combustibile;

Căldura de ardere (puterea calorică) inferioară a combustibililor gazoși se calculează cu relația:

$$H_i = \sum_{k=1}^n H_{ik} r_k \quad [\text{kJ/m}^3_{\text{N}}]$$

unde r_k este participația volumică a elementului k .

Relațiile de calcul ale căldurii de ardere (puterii calorice) sunt aproximative, deoarece că nu țin seama de faptul că o parte din aceasta este utilizată la ruperea legăturilor chimice.

Ca exemplu de calcul a căldurii de ardere (puterii calorice) inferioare pentru un combustibil solid sau lichid, poate fi prezentată relația:

$$H_i = 33900c + 120120 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 9250s - 2510w \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Ca exemplu de calcul a căldurii de ardere (puterii calorice) inferioare pentru un combustibil gazos, poate fi prezentată relația:

$$H_i = 12720(c_o) + 10800(h_2) + 35910(ch_4) \dots \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3_{\text{N}}} \right]$$

O noțiune foarte des utilizată în analize tehnico-economice, este cea de *combustibil convențional*, desemnând combustibilul fictiv având căldura de ardere (puterea calorică) inferioară:

$$H_{\text{icc}} = 29300 \text{ kJ}/(\text{kg}_{\text{cb}}) \approx 7000 \text{ kcal}/(\text{kg}_{\text{cb}})$$

Cantitatea de combustibil convențional (m_{cc}), echivalentă cu o cantitate dată de combustibil solid sau lichid (m_{cb}) având puterea calorică (căldura de ardere) inferioară H_i , se poate determina din condiția $m_{cc} \cdot H_{i_{cc}} = m_{cb} \cdot H_i$:

$$m_{cc} = m_{cb} \frac{H_i}{29300} \quad [\text{kg}_{cc}]$$

Cantitatea de combustibil convențional (m_{cc}), echivalentă cu un volum oarecare de combustibil gazos se poate calcula asemănător $m_{cc} \cdot H_{i_{cc}} = V_{N,cb} \cdot H_i$:

$$m_{cc} = V_{N,cb} \frac{H_i}{29300} \quad [\text{kg}_{cc}]$$

Astfel, de exemplu pentru 100 m³N de metan (CH₄) cu căldura de ardere (puterea calorică) inferioară $H_i = 35583 \text{ kJ/m}^3\text{N}$, cantitatea echivalentă de combustibil convențional este:

$$m_{cc} = \frac{100 \cdot 35583}{29300} = 121,44 \text{ kg}_{cc}$$

Noțiunea de combustibil convențional este utilizată mai ales în calcule economice, referitoare la combustibili sau la consumuri energetice echivalente.

În tabelul alăturat sunt prezentate căldurile superioară și inferioară de ardere a unor combustibili uzuali.

Căldura superioară și inferioară de ardere a unor combustibili uzuali

Combustibili	Densitate* [kg/m ³]	Căldura superioară de ardere			Căldura inferioară de ardere		
		MJ/kg	MJ/l	MJ/m ³	MJ/kg	MJ/l	MJ/m ³
Lemn (uscat)	0.701	16.2			15.4		
Turbă		17.0					
Mangal		29.6			28.4		
Lignit		14.0					
Antracit		32.6					
Benzină	0.737	46.4	34.2		43.4	32.0	
Motorină	0.846	45.6	38.6		46.2	36.0	
Etanol	0.789	29.7	23.4		26.7	21.1	
Metanol	0.791	23.0	18.2		19.9	15.8	
Kerosen	0.821	43.0	35.3		43.0	35.3	
GPL	0.537	49.3	26.5		45.5	24.4	
Propan	0.498	50.4	25.1		46.4	23.1	
Butan	0.601	49.1	29.5		45.3	27.2	
Metan	0.716	55.5		39.8	50.0		35.8
Hidrogen	0.090	141.7		12.7	120		10.8

* Pentru combustibilii lichizi la 15 °C și 1 bar; Pentru combustibilii gazoși la 0 °C și 1 bar
https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

În tabelul alăturat este prezentată pentru fiecare din combustibilii considerați, cantitatea de apă care poate fi încălzită cu 35 °C, de la 10 °C la 45 °C, considerând căldura specifică a apei de 4.18 kJ/kgK și considerând căldurile superioare de ardere.

Cantitatea de apă care poate fi încălzită cu 35 °C

Combustibili	Cantitate		
	kg/kg	kg/l	kg/m ³
Lemn (uscat)	110.7		
Turbă	116.2		
Mangal	202.3		
Lignit	95.7		
Antracit	222.8		
Benzină	317.2	233.8	
Motorină	311.7	263.8	
Etanol	203.0	159.9	
Metanol	157.2	124.4	
Kerosen	293.9	241.3	
GPL	337.0	181.1	
Propan	344.5	171.6	
Butan	335.6	201.6	
Metan	379.4		272.0
Hidrogen	968.6		86.8

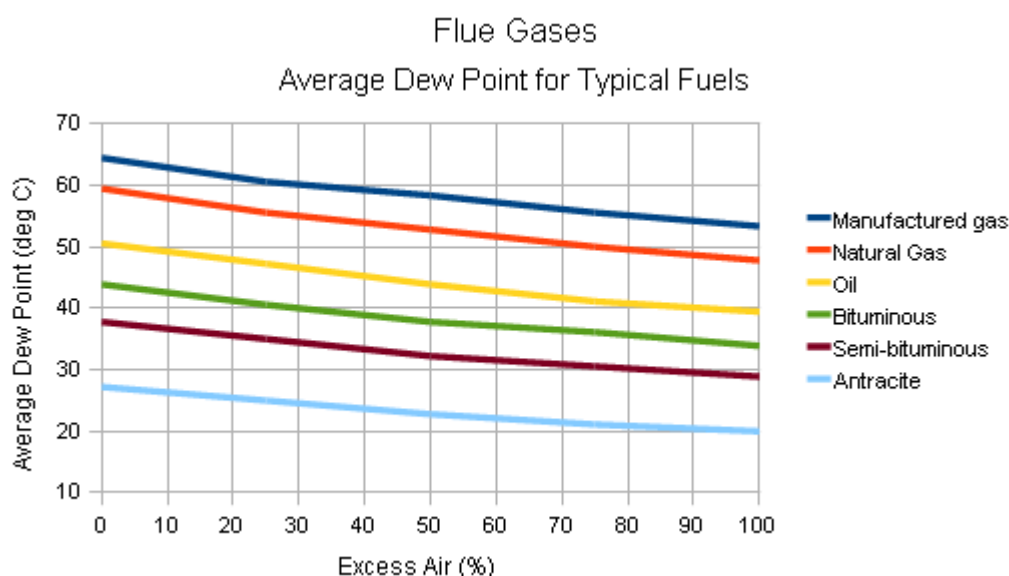
În tabelul alăturat este prezentată pentru fiecare din combustibilii considerați, durata de menținere în stare de incandescență a unui bec cu puterea de 100 W, considerând un randament de conversie a căldurii în electricitate de 35 % și considerând căldurile superioare de ardere.

Durata de menținere în stare de incandescență a unui bec cu puterea de 100 W

Combustibili	Durata		
	ore/kg	ore/l	ore/m ³
Lemn (uscat)	15.71		
Turbă	16.48		
Mangal	28.70		
Lignit	13.57		
Antracit	31.61		
Benzină	44.98	33.16	
Motorină	44.21	37.42	
Etanol	28.79	22.69	
Metanol	22.30	17.64	
Kerosen	41.69	34.22	
GPL	47.80	25.69	
Propan	48.86	24.33	
Butan	47.60	28.60	
Metan	53.81		38.59
Hidrogen	137.38		12.31

O problemă care merită atenție, este cea a „randamentelor” cazanelor (centralelor termice) „în condensare”. Aceste cazane funcționează cu gaz metan ca și combustibil și au în construcție un schimbător de căldură care răcește gazele de ardere cu ajutorul agentului termic din returul instalației de încălzire (la funcționarea în regim de încălzire) sau a apei reci (la funcționarea în regim de preparare a apei calde menajere). Scopul răcirii gazelor de ardere, este de a condensa (măcar parțial) apa din gazele de ardere, pentru a utiliza căldura de condensare a apei.

În figura alăturată, este prezentată variația temperaturii de început a condensării (denumit punct mediu / *average* de condensare) în funcție de valoarea excesului de aer, pentru diferiți combustibili. Natura combustibilului este importantă deoarece cantitatea de apă rezultată în urma procesului de ardere, depinde de natura combustibilului. În continuare va fi considerat numai combustibilul gaz natural (*natural gas*).



Variația punctului (mediu) de condensare în funcție de valoarea excesului de aer, pentru diferiți combustibili

https://www.engineeringtoolbox.com/docs/documents/1584/flue_gases_average_dew_point_typical_fuels.png

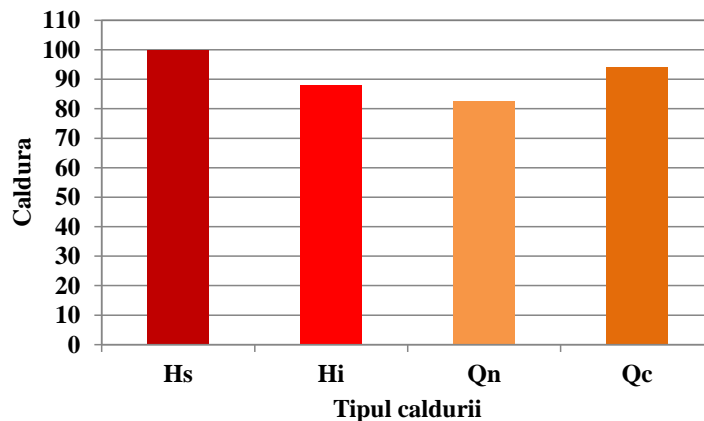
Se observă că pentru un exces de aer de (20-40) %, tipic pentru aceste cazane, temperatura de început a condensării este de cca. (54-57) °C. În aceste condiții, temperatura agentului de răcire a gazelor de ardere trebuie să fie mai mică decât temperatura de început a condensării. Dacă se consideră diferența minimă de temperatură dintre gazele de ardere și agentul de răcire de cca. (5-10) °C, atunci temperatura agentului de răcire este de maxim (45-50) °C.

În aceste condiții este evident că într-o instalație de încălzire cu radiatoare (calorifere), indiferent de tipul acestora (oțel sau fontă), nu se va produce condensarea gazelor de ardere, deoarece regimul termic al agentului de încălzire în aceste sisteme de încălzire este de (60-80) °C sau (50-70) °C. În aceste tipuri de instalații, cazanul funcționează prin „condensare” numai în regim de preparare apă caldă menajeră, când apa rece are la intrarea în schimbătorul de căldură o temperatură de (10-15) °C.

Pentru o funcționare a cazanului în „condensare”, sistemul de încălzire trebuie să prezinte un regim termic al agentului termic de (35-40) °C sau (40-45) °C. Aceste regimuri termice sunt specifice sistemelor de încălzire în pardosea sau cu ventiloconvectoare.

Pentru aceste tipuri de cazane, pe fișele tehnice se întâlnesc valori ale randamentelor, care depășesc valoarea de 100 %!!! Aceste valori trebuie interpretate cu atenție și în nici un caz nu trebuie înțeles că aceste cazane ar livra în sistemul de încălzire mai multă căldură decât se obține prin arderea combustibilului.

În figura alăturată sunt prezentate câteva călduri, asociate cu cazanele din sistemele de încălzire.



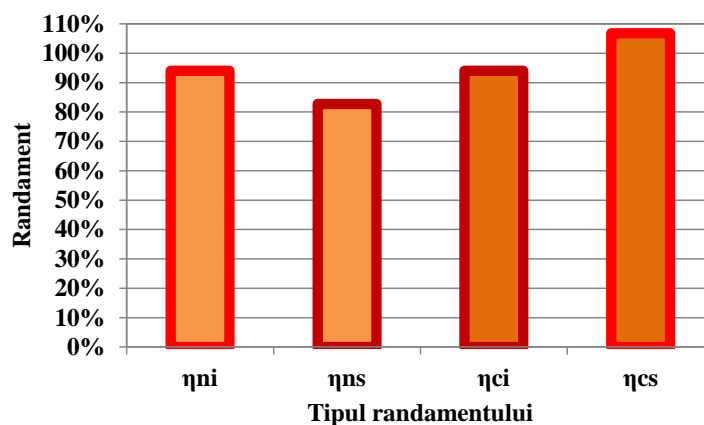
Călduri, asociate cu cazanele din sistemele de încălzire

Semnificația mărimilor reprezentate pe grafic este:

- Hs: Căldura superioară de ardere
- Hi: Căldura inferioară de ardere
- Qn: Căldura furnizată în sistemul de încălzire (în condiții normale / fără condensare)
- Qc: Căldura furnizată în sistemul de încălzire (în condiții cu condensare)

Unitățile de măsură sunt „generice” și nu sunt menționate, deoarece valorile au doar caracter comparativ.

În figura alăturată sunt prezentate câteva valori ale randamentelor, care au fost definite prin împărțirea căldurilor furnizate în sistemul de încălzire, la cele două „referințe” posibile: căldura inferioară de ardere, respectiv căldura superioară de ardere.



Randamente ale cazanelor

Semnificația randamentelor reprezentate este:

- $\eta_{ni} = 94\%$: Căldura în condiții normale / Căldura inferioară de ardere
- $\eta_{ns} = 83\%$: Căldura în condiții normale / Căldura superioară de ardere
- $\eta_{cs} = 94\%$: Căldura în condiții prin „condensare” / Căldura superioară de ardere
- $\eta_{ci} = 107\%$: Căldura în condiții prin „condensare” / Căldura inferioară de ardere

Referitor la valorile acestor randamente se pot efectua câteva comentarii:

- $\eta_{ni} = \eta_{cs} = 94\%$: Înseamnă că procesele din cele două tipuri de cazane sunt asemănătoare din punct de vedere al eficienței energetice.
- $\eta_{ns} = 83\%$: Producătorii de cazane „normale / clasice” nu doresc să își „declaseze” performanțele cazanelor, prin raportarea la căldura superioară de ardere, în locul celei inferioare de ardere.
- $\eta_{ci} = 107\%$: Utilizarea acestui randament este „forțată” doar pentru a se păstra raportarea la căldura inferioară de ardere.

Calculul procesului de ardere

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

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

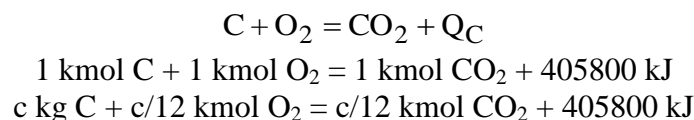
Cantitatea de aer necesară arderii este foarte importantă pentru că dacă nu se asigură o cantitate suficientă de oxigen, respectiv de aer, arderea va fi incompletă, iar dacă se introduce prea mult oxigen, deci aer, se diminuează temperatura de ardere, pentru că aerul în exces preia o parte din căldură și în plus crește cantitatea de gaze de ardere rezultate.

Cantitatea de gaze rezultată în urma arderii este esențială pentru dimensionarea tubulaturii pentru evacuarea acestora, pentru dimensionarea coșului de fum și pentru dimensionarea sistemelor de recuperare a căldurii din gazele de ardere.

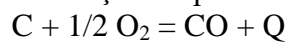
Ecuțiile arderii

Pentru fiecare element combustibil, trebuie scrisă ecuația procesului de oxidare (ardere):

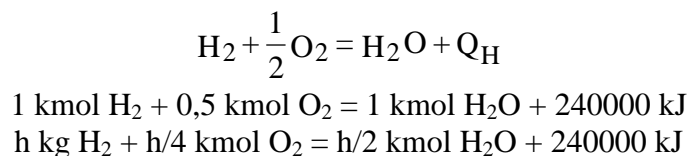
Arderea carbonului:



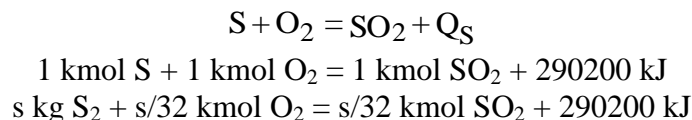
Dacă arderea carbonului este incompletă se obține ca produs de ardere oxidul de carbon (CO):



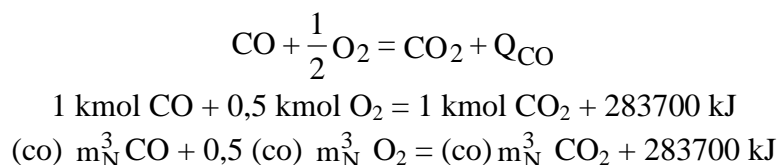
Arderea hidrogenului în combustibilii solizi sau lichizi:



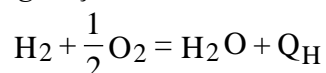
Arderea sulfurii:



Arderea oxidului de carbon:



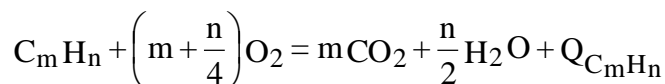
Arderea hidrogenului în combustibilii gazoși:



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

$$(\text{h}_2) m_{\text{N}}^3 \text{ H}_2 + 0,5 (\text{h}_2) m_{\text{N}}^3 \text{ O}_2 = (\text{h}_2) m_{\text{N}}^3 \text{ H}_2\text{O} + 240000 \text{ kJ}$$

Arderea unei hidrocarburi:



$$1 \text{ kmol C}_m\text{H}_n + (m+n/4) \text{ kmol O}_2 = m \text{ kmol CO}_2 + n/2 \text{ kmol H}_2\text{O} + Q_{\text{C}_m\text{H}_n}$$

$$(c_m h_n) m_{\text{N}}^3 \text{ C}_m\text{H}_n + (m+n/4)(c_m h_n) m_{\text{N}}^3 \text{ O}_2 = m(c_m h_n) m_{\text{N}}^3 \text{ CO}_2 + n/2(c_m h_n) m_{\text{N}}^3 \text{ H}_2\text{O} + Q_{\text{C}_m\text{H}_n}$$

Aceste relații vor fi utilizate în continuare în calculul procesului de ardere.

Calculul procesului de ardere pentru combustibili solizi și lichizi

Volumul 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 volumelor de oxigen ce intră în ecuațiile arderii fiecărui component combustibil și ținând seama de volumul de oxigen conținut de combustibil:

$$O_{\min} = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) \left[\frac{\text{kmol O}_2}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

Se observă că dacă în compoziția combustibilului există deja oxigen, având participația masică (o), acesta nu mai trebuie să fie introdus din exterior, în focar. Relația anterioară poate să fie scrisă și sub forma:

$$O_{\min} = 22,414 \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) \left[\frac{\text{m}_{\text{N}}^3 \text{O}_2}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

Considerând că oxigenul minim necesar arderii este asigurat din aer și că aerul este uscat, deci nu conține umiditate, cum participația volumică a oxigenului în aer este de 21%, se poate calcula volumul minim de aer necesar arderii, denumit și *aerul minim necesar arderii* (L_{\min}), cu relația:

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

Dacă aerul este umed și are umiditatea x [kg um. / kg aer uscat], atunci, notând densitatea aerului uscat în starea normală cu ρ_{Naer} și densitatea umidității în starea normală cu ρ_{Num} , aerul minim necesar arderii se calculează cu relația:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} \left(1 + x \frac{\rho_{\text{Naer}}}{\rho_{\text{Num}}} \right) = \frac{O_{\min}}{0,21} (1 + 1,61x) \left[\frac{\text{m}_{\text{N}}^3 \text{ aer um}}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

Pentru ca arderea să fie completă, chiar în condițiile asigurării oxigenului, respectiv aerului minim necesar, este obligatoriu ca amestecul dintre combustibil și aer, respectiv oxigen, să fie perfect, astfel încât fiecare moleculă de element combustibil să ajungă în contact cu numărul necesar de molecule de oxigen. În aceste condiții ar putea să fie realizată oxidarea fiecărei molecule de element combustibil. În realitate acest amestec perfect este imposibil de realizat. În consecință, pentru a nu rămâne particule combustibile nearse, 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.

Volumul de aer introdus în mod real în procesul de ardere, denumit și *aerul real de ardere* (L), poate fi determinat utilizând un parametru denumit *coeficientul excesului de aer*, sau mai simplu *excesul de aer* (λ), 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: $\lambda = 1,15...1,4$

Pentru arderea în MAS, dacă se dorește randament termic maxim, se recomandă un amestec sărac (cu mai mult aer și mai puțin combustibil):

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

Pentru arderea în MAS, dacă se dorește putere maximă, se recomandă un amestec bogat (cu mai puțin aer și mai mult combustibil):

$$\lambda = 0,85 \dots 0,9$$

Pentru arderea în MAC se recomandă:

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

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

$$V_{\text{aer}} = m_{cb} \lambda L_{\min} \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}_{cb}} \right]$$

Dacă se cunoaște debitul de combustibil \dot{m}_{cb} [kgs⁻¹], se determină și debitul necesar de aer, împărțind relația anterioară cu timpul:

$$\dot{V}_{\text{aer}} = \dot{m}_{cb} \lambda L_{\min} \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}_{cb}} \cdot \text{s}^{-1} \right]$$

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

$$V_g^{\min} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}_{cb}} \right]$$

Volumele parțiale ale fiecărui element în parte, din compoziția gazelor de ardere, se calculează din ecuațiile arderii elementelor combustibile:

pentru CO_2 :

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{c}{12} \text{ kmol CO}_2 = \frac{22,414}{12} c = 1,867c \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}_{cb}} \right]$$

pentru H_2O :

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 22,414 \left(\frac{h}{2} + \frac{w}{18} \right) + 1,61x = 1,274h + 1,245w + 1,61x \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}_{cb}} \right]$$

pentru SO_2 :

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,414}{32} s = 0,7s \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}_{cb}} \right]$$

Volumul de azot, V_{N_2} conținut de aerul minim necesar arderii se calculează ținând seama de participația volumică a azotului în aerul uscat:

$$V_{\text{N}_2} = 0,79L_{\min} \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}_{cb}} \right]$$

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

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

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

$$V_g^{\text{us}} = V_g^t - V_{\text{H}_2\text{O}} \left[\frac{m_N^3}{kg_{cb}} \right]$$

Volumul gazelor uscate este foarte important în controlul arderii, pentru că experimental se determină compoziția gazelor uscate. Echipamentele utilizate pentru controlul arderii, denumite analizoare de gaze, sunt prevăzute cu sisteme de condensare a apei conținute de probele de gaze supuse analizei. Astfel, în procesul de analiză chimică a compoziției gazelor de ardere intră doar gazele uscate.

Calculul procesului de ardere pentru combustibili gazoși

Oxigenul minim necesar arderii, se poate calcula din reacțiile de ardere ale elementelor combustibile gazoase:

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

Pentru a calcula aerul minim necesar arderii, aerul real și excesul de aer, pentru combustibilii gazoși, sunt valabile relațiile prezentate anterior în cazul combustibililor solizi și lichizi.

Pentru combustibili gazoși se recomandă: $\lambda = 1,05 \dots 1,3$.

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:

$$V_g^{\min} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} \left[\frac{m_N^3}{m_N^3 Cb} \right]$$

Fiecare volum parțial în parte se poate calcula după cum urmează:

pentru CO₂:

$$V_{\text{CO}_2} = (co) + \sum m(c_m h_n) + (co_2)$$

(co₂) reprezintă participația volumică a bioxidului de carbon din compoziția inițială a combustibilului gazos;

pentru H₂O:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = (h_2) + \sum \frac{m}{2} (c_m h_n) + (w)$$

(w) reprezintă umiditatea inițială a combustibilului;

pentru V_{N₂}:

$$V_{\text{N}_2} = 0,79L_{\min} \left[\frac{m_N^3}{kg_{cb}} \right]$$

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

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

$$V_g^{\text{us}} = V_g^t - V_{\text{H}_2\text{O}} \left[\frac{m_N^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

Controlul arderii

Arderea este un proces fizico-chimic extrem de complex, care depinde de condițiile în care se desfășoară, de natura combustibilului, de caracteristicile consumatorului de căldură și de alți factori, fiind practic imposibilă o ardere perfectă. Măsura în care arderea se apropie de perfecțiune, este determinată prin controlul arderii. Această operație se realizează prin determinarea experimentală a compoziției gazelor de ardere și prin determinarea analitică sau grafică a coeficientului excesului de aer. Unul din rezultatele finale al controlului arderii este determinarea randamentului arderii.

Pe baza constatărilor efectuate, se pot stabili măsuri în vederea îmbunătățirii sau optimizării procesului de ardere. De exemplu absența carbonului și a oxidului de carbon din gazele de ardere denotă o ardere perfectă, dar prezența acestor elemente indică imperfecțiuni. Prezența unor elemente combustibile în gazele de ardere, chiar în proporții reduse, indică o ardere imperfectă din punct de vedere chimic. Experimental s-a constatat că îmbunătățirea calității procesului de ardere poate să fie realizată, de exemplu prin modificarea excesului de aer.

Compoziția gazelor de ardere se verifică experimental, prin prelevarea unor probe de gaze arse. Aparatul care efectuează analiza chimică a compoziției gazelor de ardere este denumit *analizor de gaze*. Pe conducta de legătură dintre priza de prelevare a probei de gaze și modulul de analiză chimică a analizoarelor de gaze, se produce condensarea vaporilor de apă conținuți de aceste gaze. Din acest motiv se efectuează de fapt *analiza compoziției gazelor de ardere uscate*, de aceea în relațiile de calcul, se va asocia fiecărui element chimic, indicele u (de la uscat).

În figurile alăturate este prezentată o imagine a unui analizor de gaze și un buletin de analiză a gazelor de ardere.



Analizor de gaze de tip MAXILYZER NG

```
MAXILYZER
seria nr. 46
-----
Masurare curenta
-----
COMBUSTIBIL
gaz metan
-----
Masura completa
-----
Oras: 10:07:17
Data: 5.12.12
-----
O2 3.4 %
CO 4 ppm
CO2 9.9 %
NO 78 ppm
NOx 81 ppm
SO2 8 ppm
T.gaze 145 °C
T.aer 16.1 °C
Dif.t. 128.9 °C
Randa. 94.8 %
RA 6.0 %
Lambda 1.19
CO 0% 6 ppm
NO 0% 94 ppm
NOx 0% 96 ppm
SO2 0% 8 ppm
-----
Tiraj --- hPa
Punct C 54.7 °C
Rand.C. 94.8 %
-----
T.cazani 8°C
Furnizare ...
Reziduu comb. ...
```


Material suplimentar

Diagrama entalpie-temperatură (h-t)

Diagrama entalpie-temperatură reprezintă graficul de variație a entalpiei gazelor rezultate din arderea unității de cantitate de combustibil, în funcție de temperatura acestora și de coeficientul excesului de aer.

Dacă se cunoaște entalpia fiecărui component din gazele de ardere, entalpia gazelor de ardere se poate calcula cu relația:

$$h = h_{\text{CO}_2} + h_{\text{H}_2\text{O}} + h_{\text{SO}_2} + h_{\text{N}_2} + h_{\text{aer}}^{\text{ex}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

în care înlocuind entalpiile componentilor se obține pentru combustibili solizi și lichizi:

$$h = V_{\text{CO}_2} c_{p\text{CO}_2} t + V_{\text{H}_2\text{O}} (r_v + c_{p\text{H}_2\text{O}} t) + V_{\text{SO}_2} c_{p\text{SO}_2} t + V_{\text{N}_2} c_{p\text{N}_2} t + (\lambda - 1) L_{\text{min}} c_{p\text{aer}} t \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

unde c_{pi} reprezintă căldura specifică volumică medie, la presiune constantă a componentului i , $[\text{kJ}/(\text{m}_N^3 \text{K})]$ în intervalul de temperaturi $(0..t)^\circ\text{C}$ și V_i reprezintă volumul componentului i în gazele de ardere $[\text{m}_N^3/\text{kg}_{\text{cb}}]$.

Trasarea diagramei entalpie-temperatură (h-t) se realizează prin puncte, pentru mai multe valori ale temperaturilor gazelor de ardere (t) și pentru diferite valori ale excesului de aer (λ). Pentru un șir de valori ale temperaturii (t), se citesc din tabele valorile căldurilor specifice medii (c_{pi}) care apar în relația pentru calculul entalpiei, prezentată anterior. Cunoscând compoziția gazelor de ardere, se pot calcula valorile entalpiilor (h) corespunzătoare, iar apoi prin puncte se trasează curbele obținute.

Experimental s-a constatat că determinarea compoziției gazelor de ardere are o importanță mult mai redusă decât determinarea temperaturii, astfel încât s-a putut realiza o singură diagramă H-t pentru toți combustibilii, indiferent dacă sunt solizi, lichizi sau gazoși, pentru determinarea entalpiei gazelor de ardere (H) fiind importantă doar cunoașterea temperaturii (t) și a excesului de aer (λ).

Alura diagramei entalpie-temperatură (h-t) este prezentată în figura alăturată.

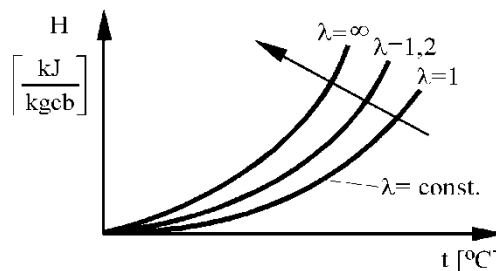


Diagrama H-t a gazelor de ardere

În unele lucrări de specialitate, entalpia gazelor de ardere este raportată la volumul de gaze rezultat din arderea unui kilogram de combustibil. În acest caz alura diagramei h-t este cea prezentată alăturat.

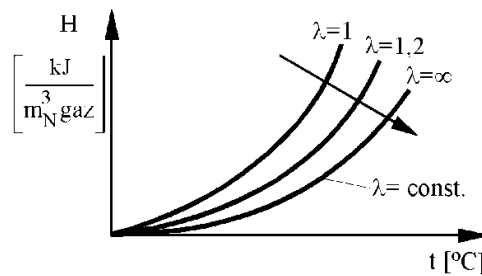
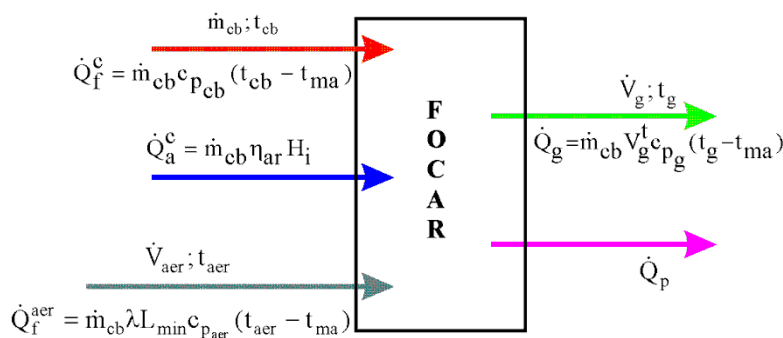


Diagrama H-t a gazelor de ardere

Temperatura de ardere

Temperatura de ardere reprezintă temperatura gazelor de ardere. Pentru calculul acesteia se scrie ecuația de bilanț termic a procesului de ardere, conform schemei principale din figura alăturată.



Se poate defini randamentul arderii (η_{ar}), datorat imperfecțiunilor interne ale acestui proces foarte complex, prin raportul dintre căldura reală obținută în urma arderii unității de cantitate de combustibil și căldura de ardere (puterea calorică) inferioară a combustibilului respectiv:

$$\eta_{ar} = \frac{Q_a^c}{H_i}$$

Ecuația de bilanț termic a arderii se poate scrie sub forma:

$$\dot{Q}_f^{cb} + \dot{Q}_f^{aer} + \dot{Q}_a^c = \dot{Q}_g + \dot{Q}_p \text{ [kW]}$$

unde fiecare putere termică (flux termic) în parte poate să fie calculată după cum urmează:

Puterea termică datorată căldurii fizice a combustibilului, considerat la temperatura t_{cb} mai mare decât a mediului ambiant t_{ma} este:

$$\dot{Q}_f^{cb} = \dot{m}_{cb} c_{p_{cb}} (t_{cb} - t_{ma}) \text{ [kW]}$$

Puterea termică datorată căldurii fizice a aerului, considerat la temperatura t_{aer} este:

$$\dot{Q}_f^{aer} = \dot{m}_{cb} \lambda L_{min} c_{p_{aer}} (t_{aer} - t_{ma}) \text{ [kW]}$$

Puterea termică reală obținută în urma arderii combustibilului este:

$$\dot{Q}_a^c = \dot{m}_{cb} \eta_{ar} H_i \text{ [kW]}$$

Puterea termică a gazelor de ardere, aflate la temperatura de ardere t_g este:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_{cb} V_g^t c_{p_g} (t_g - t_{am}) \text{ [kW]}$$

Puterea termică pierdută în mediul ambiant (\dot{Q}_p), reprezintă pierderile prin imperfecțiunea izolației termice a incintei de ardere, datorită faptului că gazele de ardere au temperatura mai ridicată decât a mediului ambiant.

Dacă se înlocuiesc relațiile anterioare în ecuația de bilanț, se poate calcula temperatura de ardere t_g :

$$t_g = t_{ma} + \frac{\dot{m}_{cb} c_{p_{cb}} (t_{cb} - t_{ma}) + \dot{m}_{cb} \eta_{ar} H_i}{\dot{m}_{cb} V_g^t c_{p_g}} + \frac{\dot{m}_{cb} \lambda L_{min} c_{p_{aer}} (t_{aer} - t_{ma}) - \dot{Q}_p}{\dot{m}_{cb} V_g^t c_{p_g}}$$

Considerând cazul particular în care nu se pierde căldură în mediul ambiant ($\dot{Q}_p = 0$), temperaturile combustibilului și aerului sunt egale între ele și cu temperatura mediului ambiant ($t_{cb} = t_{aer} = t_{am}$) și în plus arderea este perfectă ($\eta_{ar} = 1$) se obține *temperatura teoretică de ardere*:

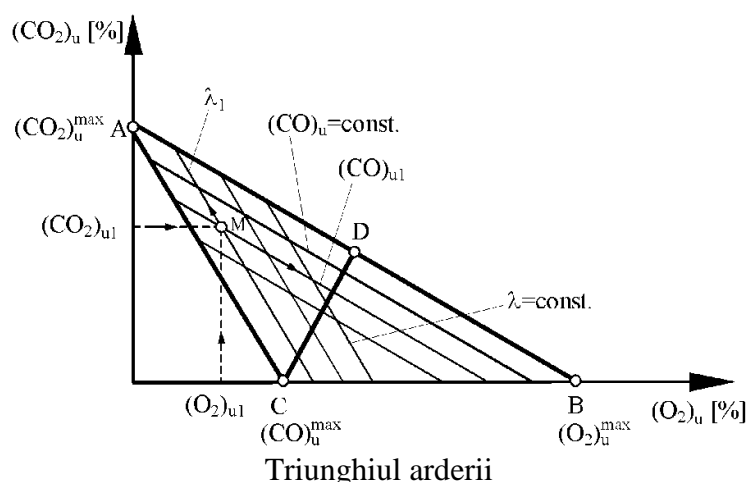
$$t_{gt} = t_{ma} + \frac{H_i}{V_g^t c_{p_g}} \quad [^{\circ}C]$$

Temperatura teoretică de ardere este imposibil de atins practic, deoarece în momentul în care s-a produs arderea, instantaneu începe și procesul de transfer termic prin radiație, de la gazele de ardere spre mediul ambiant, ceea ce face ca temperatura acestora să scadă față de temperatura teoretică de ardere, care rămâne totuși o mărime teoretică de referință în studiul procesului de ardere.

Controlul grafic-experimental

Prin control grafic-experimental al arderii, se înțelege stabilirea experimentală a unor elemente din compoziția gazelor de ardere, urmată de determinarea grafică a coeficientului excesului de aer. Metoda este mai puțin utilizată actualmente în practică și a fost definită în condițiile în care metoda experimentală de analiză a compoziției gazelor de ardere era mult mai limitată.

Pentru fiecare tip de combustibil a fost trasată câte o diagramă care permite stabilirea pe cale grafică a unei legături între compoziția chimică a gazelor de ardere și excesul de aer corespunzător acelei compoziții. Această diagramă poartă denumirea de *triunghiul arderii*, sau *diagrama Ostwald*, și are structura prezentată în figura alăturată.



Orice proces de ardere este caracterizat printr-un punct în triunghiul arderii. Punctele marcate pe figura au următoarea semnificație:

- A corespunde arderii complete, stoichiometrice ($\lambda = 1$);
- B corespunde arderii complete, cu exces de aer infinit ($\lambda = \infty$);
- C reprezintă concentrația oxigenului în gazele de ardere pentru o ardere incompletă în care $(CO_2)_u = 0$, iar $(CO)_u = \text{maxim}$;
- D reprezintă intersecția dintre dreapta AB și perpendiculara ridicată din C, pe AB.

Dreapta AB reprezintă locul geometric al punctelor corespunzătoare arderii complete, cu diferite valori ale excesului de aer (λ). În urma analizei compoziției gazelor de ardere, se obține un punct care definește procesul respectiv de ardere, iar acel punct trebuie să se găsească în interiorul triunghiului arderii, sau la limită pe dreapta AB. Dacă punctul se găsește în afara triunghiului, atunci determinările experimentale sunt eronate. Dreptele paralele la AB sunt drepte având concentrația de CO constantă, iar această concentrație crește de la D ($c_{CO} = 0$) spre C ($c_{CO} = (c_{CO})_{max}$). Dreptele paralele la AC sunt drepte cu exces de aer (λ) constant, această mărime crește de la punctul A ($\lambda = 1$) spre punctul B ($\lambda = \infty$).

Coordonatele tuturor punctelor caracteristice ale triunghiului arderii pot să fie calculate, sau determinate grafic.

Punctul A are ordonata:

$$y_A = (c_{CO_2})_u^{max} = \frac{V_{CO_2}^{max}}{V_g^u} 100 \text{ [%]}$$

unde $V_{CO_2}^{max}$ este volumul de CO_2 la ardere completă.

În cazul combustibililor solizi și lichizi, volumul de bioxid de carbon se poate calcula cu relația:

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{max}} = 1,867c \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \right]$$

iar volumul gazelor de ardere uscate, cu relația:

$$V_g^u = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \right]$$

în care:

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7s \quad ; \quad V_{\text{N}_2} = 0,79L_{\text{min}}$$

În cazul combustibililor gazoși, volumul de bioxid de carbon se poate calcula cu relația:

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{max}} = (co) + \sum m(c_m h_n) + (co_2) \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{m}_N^3} \right]$$

iar volumul gazelor de ardere uscate, cu relația:

$$V_g^u = V_{\text{CO}_2} + (n_2) + V_{\text{N}_2} \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{m}_N^3} \right]$$

Punctul B, deoarece corespunde excesului de aer $\lambda = \infty$, are abscisa:

$$x_B = (o_2)_u = 0,21\%$$

Punctul C este determinat de $\lambda = 1$, la arderea incompletă pentru care rezultă numai CO, prin abscisa:

$$x_C = (o_2)_u^{\text{CO}} = \frac{V_{\text{O}_2}^{\text{CO}}}{V_g^{\text{CO}}} 100 \quad [\%]$$

În cazul combustibililor solizi și lichizi:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{CO}} = 0,21 \left(L_{\text{min}} - \frac{1}{0,21} \frac{22,414}{2 \cdot 12} c \right) \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \right]$$

iar

$$V_g^{\text{CO}} = 1,867c + 0,7s + 0,79L_{\text{min}} \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \right]$$

În cazul combustibililor gazoși:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{CO}} = 0,21 \left[L_{\text{min}} - \frac{1}{0,21} \sum \left(\frac{m}{2} + \frac{n}{4} \right) (c_m h_n) \right] \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{m}_N^3} \right]$$

iar

$$V_g^{\text{CO}} = \sum m(c_m h_n) + (co) + (co_2) + 0,79L_{\text{min}} \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{m}_N^3} \right]$$

Punctul D se obține prin construcția grafică descrisă anterior.

De regulă analiza limitată a compoziției gazelor de ardere, pentru care a fost determinată această metodă de control a arderii constă în determinarea numai a participației oxigenului și a bioxidului de carbon, de exemplu $(O_2)_{u1}$ și $(CO_2)_{u1}$. Apoi se fixează pe triunghiul arderii punctul M având ca și coordonate aceste mărimi și se determină grafic participația oxidului de carbon $(CO)_{u1}$, respectiv excesul de aer (λ_1). Cunoscând poziția punctului caracteristic arderii, se poate stabili direcția în care trebuie acționat pentru micșorarea concentrației de (CO), prin asigurarea unei valori λ , care să asigure și o temperatură dorită a gazelor de ardere.

Dacă experimental se determină în plus față de participația oxigenului și a bioxidului de carbon, și participația oxidului de carbon (CO), se poate verifica și cât de corecte sunt măsurătorile efectuate, pentru că $(CO)_{u1}$ determinat grafic trebuie să fie aproximativ egal cu $(CO)_{u1}$ stabilit experimental.