

# Combustibili

(note de curs)

## Cuprins

<b>Cuprins</b> .....	<b>2</b>
1.1 Generalități .....	4
1.2 Clasificarea combustibililor .....	5
1.3 Proprietățile generale ale combustibililor .....	7
1.3.1 Compoziția combustibililor .....	7
1.3.2 Combustibili gazoși .....	8
1.3.3 Combustibili lichizi .....	10
1.3.4 Combustibili solizi .....	14
1.4 Căldura de ardere inferioară. Căldura de ardere superioară .....	20
1.4.1 Definiție .....	20
1.4.2 Determinarea experimentală a căldurii de ardere. Bomba calorimetrică	21
1.5 Indicele Wobbe .....	24
1.6 Combustibilul convențional .....	26
1.7 Exergia combustibililor .....	27
Referințe bibliografice .....	38

## **Anexe**

Anexa 1. Temperatura de inflamabilitate pentru diverși combustibili [4] .....	30
Anexa 2. Valori ale căldurii de ardere superioare și inferioare pentru unele elemente combustibile .....	32
Anexa 3. Valori ale căldurii de ardere inferioare pentru diverși combustibili solizi și lichizi.....	32
Anexa 4. Proprietăți termofizice pentru diferite hidrocarburi.....	33
Anexa 5. Caracteristici fizico-chimice ale lignitului de Rovinari.....	35
Anexa 6. Caracteristici fizico-chimice ale păcurii .....	36
Anexa 7. Compoziția unor gaze naturale din Ardeal .....	37
Anexa 8. Compoziția unor gaze de sondă din țară .....	37

## 1.1 Generalități

Utilizarea energiei a fost cheia dezvoltării societății moderne de azi. Managementul inteligent al energiei este astfel inevitabil în orice societate funcțională. Mărirea consumului de energie, începând cu revoluția industrială din secolul XVIII, a dus la apariția a numeroase probleme, unele din ele, ca încălzirea globală, punând în pericol întreaga planetă prin schimbarea climei. În zilele noastre, consumul de energie are o tendință ascendentă, resursele energetice primare sunt în scădere, iar emisiile de gaze cu efect de seră cresc. Datorită acestor aspecte, costul energiei este în continuă creștere, ceea ce duce la un management mult mai eficient al consumului de energie.

În ultimele mii de ani, focul a fost utilizat și controlat de către oameni fără ca niciun real progres să se înregistreze în procesul de ardere. În tot acest timp, căldura a fost obținută prin arderea lemnului, cărbunelui sau a altor combustibili. Toți combustibilii convenționali erau arși după cum ardeau natural, iar dacă se dorea o mărire a fluxului de căldură, singura soluție era ca focul să fie mai mare. Doar în ultima vreme s-a reușit performanța arderii combustibililor într-un timp mai scurt, ceea ce a dus la reducerea instalațiilor de ardere, creșterea temperaturilor, etc..

Cea mai mare pondere din energia utilizată la nivel mondial o are cea care se obține prin arderea combustibililor.

Poate fi numit combustibil orice material care stochează energie ce poate fi extrasă mai târziu în scopul efectuării de lucru mecanic într-o manieră controlată. Cu alte cuvinte, este o substanță care conține energie, în cea mai mare parte căldură, care poate fi eliberată și apoi manipulată.

Cei mai mulți combustibili utilizați de om eliberează energia conținută în ei prin reacția de ardere, o reacție redox, în care o substanță combustibilă eliberează energie, după ce se aprinde și reacționează cu oxigenul din aer.

Arderea este procesul exoterm de oxidare rapidă a unor substanțe.

Alte procese utilizate pentru a converti combustibilul în energie includ diverse alte reacții chimice exoterme și reacții nucleare, cum ar fi fisiunea nucleară sau fuziunea nucleară.

Combustibili sunt, de asemenea, utilizați în celulele organismelor într-un proces cunoscut sub numele de respirația celulară, în cazul în care molecule organice sunt oxidate pentru a elibera energia utilizabilă.

Hidrocarburile sunt de departe cea mai comună sursă de combustibil utilizat de către oameni, dar multe alte substanțe, cum ar fi metalele radioactive, sunt utilizate în prezent, de asemenea.

Termenul de combustibil este în general limitat la substanțele care pot suferi un proces de oxidare rapidă în prezența unui oxidant (de obicei aer), emanând cantități mari de căldură. Combustibilul poate fi considerat o resursă finită de energie potențială chimică în care energia stocată în structura moleculară a unor compuși este eliberată prin reacții chimice complexe.

Pentru ca o substanță să poată fi numită combustibil, trebuie să îndeplinească anumite criterii:

- Să reacționeze exoterm cu oxigenul (în special cu cel din aer), cu viteză mare (pentru a putea produce căldură care să poată fi utilizată), și la temperaturi ridicate;
- Să fie stabilă în timp, menținându-și proprietățile fizico-chimice;
- Să fie răspândită în natură, preț de cost cât mai mic, accesibilă și să nu poată fi folosită avantajos din punct de vedere tehnico-economic (se exclud astfel din categoria combustibililor unele substanțe organice - alcooli, R-OH, eteri);
- Să nu conțină o cantitate mare de deșeuri ( cenușă), produși de ardere corozivi pentru suprafețele cu care intră în contact și/sau vătămători pentru mediu și sănătatea oamenilor;
- Să prezinte o tehnologie de ardere cât mai simplă.

Aceste condiții sunt îndeplinite cel mai bine de către actualii combustibili clasici (cărbuni, petrol și produsele sale, gaze naturale, etc.).

## 1.2 Clasificarea combustibililor

Combustibilii se clasifică după mai multe criterii.

În funcție de starea de agregare :

- combustibili solizi;
- combustibili lichizi;
- combustibili gazoși.

În funcție de modul în care au fost obținuți:

- combustibili naturali;
- combustibili artificiali (produși din cei naturali, prin procedee industriale);
- combustibili sintetici (fabricați din alte substanțe, pe cale industrială).

În funcție de proveniență:

- Combustibili fosili - Rezultatul unui proces îndelungat de acumulare și descompunere a acestora.
- Combustibili regenerabili - Se produc în mod natural de la an la an sau la diferite perioade de timp.

Tabel 1. Clasificarea combustibililor în funcție de modul de obținere

Combustibili	Combustibili naturali	Combustibili artificiali	Combustibili sintetici
Combustibili solizi	Paie Lemn Turbă Cărbune brun Cărbune brun huios Huilă Antracit Șisturi combustibile	Mangal Semicocs Cocs de cărbune Cocs de petrol Brichete de cărbune Deșeuri combustibile (rumeguș, talaș, coji de semințe, etc.) Deșeuri menajere combustibile	Combustibili pentru rachete
Combustibili lichizi	Țiței	Benzină Petrol lampant Combustibil pentru aviație Petrol pentru reactoare Motorină Păcură Gaze lichefiate	Benzină Izopropilbenzen Neohexan Alchilați Metanol Combustibili pentru rachete
Combustibili gazoși	Gaze naturale Gaze de sondă	Gaze de: furnal, cocserie, semicocserie, generator, rafinărie	Hidrogen

Tabel 2. Clasificarea combustibililor în funcție de proveniență

Combustibili	Combustibili fosili	Combustibili regenerabili
Combustibili solizi	Cărbune Șisturi combustibile	Paie Lemn Frunze Deșeuri combustibile (rumeguș, talaș, coji de semințe, etc.) Deșeuri menajere combustibile
Combustibili lichizi	Țiței Cherosen Benzină Diesel	Bioetanol Biodiesel
Combustibili gazoși	Gaze naturale Gaze de sondă	Biogaz Gaz de piroliză

În funcție de calitate :

- combustibili inferiori ( $Q_i < 12,56$  MJ/kg);
- combustibili medii ( $12,56 < Q_i < 20,934$  MJ/kg);
- combustibili superiori ( $Q_i > 20,934$  MJ/kg).

În funcție de scopul utilizării :

- combustibili tehnologici (folosiți în diverse procese tehnologice, în scopul producerii de materii prime pentru industrie – petrochimică, cocsochimică etc.)
- combustibili energetici (folosiți pentru ardere, în scopul producerii energiei termice, mecanice sau electrice).

## 1.3 Proprietățile generale ale combustibililor

### 1.3.1 Compoziția combustibililor

Orice tip de combustibil poate fi privit ca fiind alcătuit din două părți componente:

- masa combustibilă, alcătuită din elementele active care participă la procesul de ardere
- și balastul, reprezentat prin compușii care nu iau parte la proces. Acesta se regăsește între produșii finali ai arderii, sub formă de zgură.

În principiu, elementele chimice care alcătuiesc masa combustibilă a combustibililor solizi și lichizi sunt:

- carbonul (c),
- hidrogenul (h)
- sulful (s).

Participațiile masice ale acestora au fost notate cu litere mici. 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 și are un impact puternic negativ asupra mediului înconjurător.

Alte elemente care participă la procesul de ardere sunt:

- oxigenul (o), care este existent în combustibil,
- umiditatea combustibilului (w),
- masa inertă, minerală, sau balastul, care 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 ( $h_2$ ),
- monoxid de carbon (co),
- diferite hidrocarburi de tipul ( $c_m h_n$ ) - de exemplu metanul ( $ch_4$ ),

iar ca elemente necombustibile:

- oxigen ( $o_2$ ),
- azot ( $n_2$ ),
- dioxid de carbon ( $co_2$ )
- și umiditate (w).

Între paranteze au fost notate de această dată participațiile volumice, pentru care există condiția:

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

### 1.3.2 Combustibili gazoși

Combustibilii gazoși sunt în general un amestec de hidrocarburi simple conținând în molecula lor un număr de 1-4 atomi de carbon, oxigen, gaze inerte și vapori de apă.

Gazul metan face parte din categoria hidrocarburilor parafinice. Elementul esențial al acestor hidrocarburi este faptul că atomii de carbon formează un lanț liniar (catenă deschisă). Proprietățile diverselor gaze depind de numărul și de aranjarea (poziția) atomilor de carbon și hidrogen.

Gazul natural este extras din exploatarea de gaze naturale. În conductele de transport se amestecă de obicei cu gazele de sondă. Gazele naturale au o compoziție care variază de la 100% metan până la amestecuri care conțin hidrocarburi mai grele (metan, pentan, etc.).

Gazele petrolifere lichefiate (GPL) sunt formate dintr-un amestec de propan, butan, etan și pentan în diferite concentrații.



Gazele care însoțesc țițeiul se numesc gaze de sondă, iar cele dizolvate în țițeiul din zăcământ se numesc gaze umede sau bogate. În zonele petroliere există și gaze compuse aproape exclusiv din metan, foarte asemănătoare gazelor naturale, gaze numite sărace sau uscate și provin din straturi de nisip neîmbibate cu țiței.

Combustibili gazoși artificiali pot fi obținuți prin prelucrarea termică a cărbunilor (gaze de gazogen, de furnal, de cocserie, de gazeificare subterană, etc).

Prin procedeele moderne de obținere a benzinelor din fracțiunile grele mai puțin valoroase ale țițeiului (descompunerea termică sau catalitică), se produc gaze saturate sau nesaturate care se numesc gaze de rafinare sau gaze de cracare care au o compoziție mai complexă decât a gazelor de sondă, ele conținând pe lângă hidrocarburi parafinice, hidrocarburi olefinice și hidrogen.

Mărimi care caracterizează combustibilii gazoși:

- densitatea  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>N], având pentru gazul natural aflat în condiții normale valoarea 0.716 [kg/m<sup>3</sup>N];
- densitatea relativă reprezintă raportul dintre densitatea unui volum de gaze și densitatea aceluiași volum de aer în aceleași condiții de presiune și temperatură ( $\rho_r$ );
- viscozitatea este proprietatea unui fluid de a se opune mișcării relative a particulelor constituente. În timp ce în cazul lichidelor viscozitatea scade cu creșterea temperaturii, în cazul gazelor va crește datorită agitației termice moleculare;
- compoziția volumetrică, care arată participația volumetrică a fiecărui component;
- umiditatea exprimată în grame de vapori de apă raportate la un metru cub normal de gaz uscat, d[g/m<sup>3</sup>N];
- temperatura de autoaprindere a gazului în amestec cu aerul este temperatura la care are loc autoaprinderea instantanee și explozivă, fără a exista o sursă incandescentă de aprindere, depinzând de compoziție și condițiile de desfășurare a procesului de ardere;
- temperatura de aprindere este temperatura (având o valoare întotdeauna mai mare decât cea de autoaprindere) la care are loc aprinderea de la o sursă incandescentă, iar arderea este normală.

Viscozitatea gazelor este independentă de presiune și este proporțională cu temperatura.

Efectul temperaturii în cazul viscozității dinamice pentru gaze ideale poate să fie surprins cu relația lui Sutherland:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

unde  $\mu$  este viscozitatea dinamică calculată, Pa s,

$\mu_0$  este viscozitatea dinamică la temperatura de referință, Pa s,

T este temperatura măsurată, K,

$T_0$  este temperatura de referință, K,

C este constanta lui Sutherland pentru gazul a cărui viscozitate dinamică se calculează (**Error!**

**Reference source not found.**).

Multe dintre gazele combustibile, în stare pură nu au miros, iar monoxidul de carbon este toxic. De aceea, se obișnuiește să se adauge compuși ai sulfului peste gaz pentru odorizarea sa, asemenea compuși, care au un miros neplăcut și servesc la semnalarea unei scurgeri din conductele de aprovizionare cu gaze. De regulă, se adaugă metil-mercaptan CH<sub>3</sub>SH sau etil-mercaptan CH<sub>2</sub>SH (mercaptan).

### 1.3.3 Combustibili lichizi

Singurul combustibil lichid natural este considerat țițeiul. Prin prelucrarea acestuia se obțin combustibilii lichizi artificiali.

După extracție, țițeiul se supune prelucrării. Se pot distinge, în linii mari, trei etape principale a prelucrării țițeiului:

- a) Îndepărtarea impurităților care au o altă natură chimică decât hidrocarburile;
- b) Fraționarea, prin distilare, a amestecului de hidrocarburi;
- c) Prelucrarea chimică a fracțiunilor obținute prin rafinare.

Combustibilii lichizi artificiali sunt formați din amestecuri complexe de hidrocarburi lichide și compuși ai acestora cu oxigenul, sulfurul și azotul. Acestea se obțin prin distilare fracționată sau prin dizolvarea din țiței sau din șisturi sau nisipuri bituminoase.

Combustibilii lichizi sintetici (sinteza) se obțin prin cracarea păcurii sau a motorinei, prin reformarea catalitică a petrolului sau benzinelor grele, polimerizarea termică sau catalitică a unor hidrocarburi ușoare, izomerizarea sau dehidrogenarea parțială a unor hidrocarburi (butan, hexan, etc), hidrogenarea termică a cărbunilor, sinteza catalitică a gazelor de gazogen, etc.

Combustibilii lichizi se împart în următoarele grupe:

- benzine: amestecuri de hidrocarburi care fierb între 35 și 200°C. Se utilizează în motoarele cu aprindere prin scânteie, fiind arse în stare de vapori în amestec cu aerul;
- petroluri: amestecuri de hidrocarburi care fierb între 180 și 300°C. În funcție de utilizare se întâlnesc: petrol lampant, petrol pentru tractor, petrol pentru reactor. Petrolurile sunt arse în stare de vapori în amestec cu aerul ca și benzinele;
- motorine: amestecuri complexe de hidrocarburi mai grele care fierb între 250 și 370°C, fiind arse în stare pulverizată în amestec cu aerul încălzit în motoare cu aprindere prin comprimare (Diesel);
- păcuri: amestecuri complexe de hidrocarburi grele care fierb între 350 și 550°C, având la temperatura mediului ambiant o consistență vâscoasă, semisolidă sau solidă. Sunt arse în stare pulverizată după o încălzire prealabilă la peste 100°C în focarele instalațiilor energetice sau motoare Diesel speciale;
- combustibilul de calorifer (CLU): este un amestec de produse petroliere (de obicei motorină cu păcură). Se utilizează în instalații energetice mici și se arde în stare pulverizată, fără preîncălzire prealabilă.

Multe din fracțiunile obținute sunt supuse unor tratamente chimice, fie pentru a le utiliza ca materie primă în industria chimică organică, fie pentru a le îmbunătăți calitățile lor de combustibili.

### **1.3.3.1 Cifra octanică (CO)**

În cazul motoarelor cu ardere internă procesul de ardere este influențat de calitatea combustibililor și de tipul motorului. În cazul motoarelor cu aprindere prin scânteie, combustibilii sunt din seria benzinelor. La aceste tipuri de motoare, procesul de ardere se desfășoară practic la volum constant (flacăra inițiată de la bujie se propagă prin tot spațiul de ardere până când întreaga cantitate de combustibil este arsă), ceea ce duce la creșterea temperaturii din camera de ardere.

*Capacitatea amestecului de aer și vapori de benzină de a rezista la comprimare, fără să explodeze spontan este exprimată de cifra octanică a benzinei.*

Cifra octanică nu este legată de cantitatea de căldură degajată prin ardere, adică de căldura de ardere a combustibilului, deci o benzină cu o cifră octanică mai mare nu e „mai bună” în acest sens.

Randamentul unui motor cu ardere internă crește odată cu raportul de compresie. O valoare neadekvată a acestui parametru poate duce la fenomene de detonație, preaprindere și preoxidare. Detonația se produce prin autoaprindere, urmată de arderea cu viteză explozivă a amestecului benzină-aer din fața scânteii dată de bujie.

În aceste condiții, creșterea presiunii datorată degajării bruște de căldură este atât de rapidă, încât ea acționează în contratimp asupra pistonului înainte ca acesta să ajungă la capătul cursei de comprimare, acest fapt ducând la o creștere accentuată a lucrului mecanic necesar comprimării amestecului combustibil.

Cifra octanică se stabilește prin compararea comportării benzinei cu cea a unui amestec etalon, format din hidrocarburi cu proprietăți antidetonante opuse.

Drept hidrocarbură care detonează ușor, adică are rezistența la autoaprindere mică, se folosește normal heptanul ( $C_7H_{16}$ ), căruia i se atribuie, în mod convențional cifra octanică  $CO = 0$ .

Drept hidrocarbură care detonează greu, adică are rezistența la autoaprindere mare, se folosește izooctanul (2,2,4-trimetilpentan) ( $C_8H_{18}$ ), căruia i se atribuie, în mod convențional cifra octanică  $CO = 100$ .

Cifra octanică este definită de procentul de izooctan în volumul amestecului etalon.

Făcând amestecuri din aceste două hidrocarburi, în diferite proporții, putem obține combustibili, a căror comportare, în motoarele cu explozie, este identică cu cea a mostrei de benzină pe care dorim s-o caracterizăm.

Cifra octanică a benzinei respective este egală cu proporția de izooctan, în volume, din amestecul de izooctan și n-heptan care are aceeași comportare la detonație.

### **1.3.3.2 Cifra cetanică (CC)**

În cazul motoarelor cu aprindere prin compresie, întârzierea la autoaprindere a combustibililor influențează în mod direct randamentul termic al acestor motoare. Astfel, întârzierea la autoaprindere a devenit una din cele mai importante proprietăți care caracterizează combustibilii motoarelor cu aprindere prin compresie, controlul valorii acestei proprietăți devenind o necesitate.

*Această proprietate a fost denumită cifră cetanică și caracterizează ușurința la autoaprindere a combustibilului utilizat pentru motoare cu aprindere prin comprimare.*

Cifra cetanică a unui combustibil se determină prin compararea comportării combustibilului cu cea a unui amestec etalon, format din hidrocarburi cu calități de autoaprindere opuse.

Drept hidrocarbură care se aprinde ușor, adică are rezistența la autoaprindere mică, se folosește cetanul ( $C_{16}H_{34}$ ), căruia i se atribuie, în mod convențional cifra cetanică  $CC = 100$ . Drept hidrocarbură care se aprinde greu, adică are rezistența la autoaprindere mare, se folosește  $\alpha$ -metil-naftalina ( $C_{10}H_7CH_3$ ), căreia i se atribuie, în mod convențional cifra cetanică  $CC = 0$ .

Cifra cetanică este definită de procentul de cetan în volumul amestecului etalon.

Motoarele diesel funcționează cu motorină cu  $CC$  între 40 și 55. O cifră cetanică mai mare înseamnă o autoaprindere mai rapidă, ceea ce permite fie realizarea unor motoare cu turații mai mari, fie, la aceeași turație, oferă mai mult timp pentru completarea arderii, rezultând emisii de noxe mai mici. Pentru  $CC$  mai mari de 55 aceste aspecte se plafonează.

Standardul pentru combustibilii diesel în UE, prevede o  $CC$  de minimum 51 [1].

### 1.3.3.3 Caracteristici pentru combustibilii lichizi

a) Viscositatea reprezintă rezistența pe care o opune un fluid la deplasarea particulelor sale, în timpul curgerii.

Unitatea de măsură tehnică utilizată în cazul combustibililor lichizi pentru determinarea viscozității este gradul Engler [ $^{\circ}E$ ] reprezentând raportul dintre timpul de scurgere a  $200\text{ cm}^3$  de lichid vâscos (combustibil) încălzit la o anumită temperatură și timpul de scurgere a unei cantități egale de apă distilată la  $20^{\circ}C$  printr-un orificiu calibrat.

Cunoașterea viscozității combustibililor lichizi este importantă deoarece:

- pentru păcura obișnuită, pulverizarea și arderea să se realizeze în bune condiții este necesar ca viscozitatea să se afle între  $2-3.5^{\circ}E$ ;
- puterea necesară pentru pomparea combustibilului este proporțională cu pierderea de sarcină pe conducte care la rândul ei este dependentă de viscozitate.

Viscozitatea cinematică exprimată în grade Engler se poate converti cu relația:

$$\nu = \left( 7.32^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E} \right) \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

b) Temperatura de congelare – reprezintă temperatura cea mai mare la care un combustibil lichid supus răcirii încetează să mai curgă.

În mod concret, este vorba de temperatura la care o eprubetă plină cu combustibil și înclinată la  $45^{\circ}$  nu-și schimbă meniscul timp de un minut. Păcurile din România au temperatură de congelare între  $25^{\circ}C$  și  $50^{\circ}C$ . Caracteristica de congelare este importantă pentru stocarea și transportul combustibilului.

c) Temperatura de inflamabilitate – reprezintă cea mai joasă temperatură la care un combustibil degajă suficienți vapori la presiune atmosferică normală pentru a se aprinde în prezența unei surse incandescente (flacăra scânteii electrice sau mecanice). Cunoașterea temperaturii de inflamabilitate este importantă pentru transportul, depozitarea și procesul de ardere a combustibilului în focar.

d) Temperatura de autoaprindere – reprezintă temperatura cea mai scăzută la care un amestec de vapori în aer se autoaprinde fără prezența unei surse incandescente.

Tabel 3. Temperatura de inflamabilitate

	Produs	Temperatura de inflamabilitate
Inflamabile	Propan	-104°C
	Benzină	-42°C
	Terbentină	35°C
Combustibile	Kerosen	37°C
	Diluant pentru vopsele	40°C
	Motorină	51°C

Temperatura de inflamabilitate nu trebuie confundată cu temperatura de aprindere. Prin temperatura de aprindere se înțelege temperatura cea mai mică la care poate fi inițiată arderea unei substanțe în anumite condiții standard, ardere care trebuie să se continue și după îndepărtarea sursei de aprindere.

Temperatura de autoaprindere pentru diferiți combustibili:

- motorină: 300-330°C
- păcură: 270-320°C
- metan: 580°C
- kerosen: 295°C
- benzină: 280°C
- propan: 470°C
- lemn: ~300°C

e) Agresivitatea – combustibilii arși în cazane nu trebuie să conțină substanțe cu caracter acid pentru a nu se produce corodarea instalației de alimentare și a cazanului propriu-zis. Substanțele în cauză sunt sulful și vanadiul.

După conținutul de sulf, combustibilii pot fi:

- cu conținut redus  $Sc < 1\%$
- cu conținut mediu  $1\% < Sc < 2\%$
- cu conținut ridicat  $Sc > 2\%$

unde  $Sc$  – reprezintă sulful combustibil ca suma între sulful organic și sulful din sulfuri.

Limitarea conținutului de sulf este necesară pentru evitarea corodării suprafețelor metalice interioare ale cazanelor, de către acizii apăruți (acidul sulfuric sau acidul sulfuros) ca urmare a hidrolizării compușilor de sulf ( $SO_2$  și  $SO_3$ ).

De asemenea, probleme deosebit de neplăcute creează pentaoxidul de vanadiu ( $V_2O_5$ ) conținut în cenușa din compoziția păcurii și care la temperaturi de peste 550–620°C generează compuși care atacă stratul protector al metalului.

Combustibilii lichizi prezintă avantaje față de cei solizi în ceea ce privește transportul, depozitarea și arderea.

### 1.3.4 Combustibili solizi

#### 1.3.4.1 Analiza elementară

Pentru cunoașterea unui proces de ardere în condiții optime trebuie să se cunoască analiza chimică elementară a combustibilului.

Masa de lucru este reprezentată de masa combustibilului adus la starea de lucru.

Combustibilii solizi sunt formați din masa combustibilă, masa minerală necombustibilă și umiditate.

Masa uscată la aer reprezintă masa de combustibil lipsită de umiditate prin uscarea la aer.

Masa anhidră reprezintă masa combustibilă și cea minerală lipsite total de umiditate.

Elementele C, H, O și N constituie "masa organică convențională".

Tabel 4. Analiza elementară pentru 1kg combustibil

Combustibil	C	H	N	O	S		A	W		Analiza elementară pentru 1kg combustibil
Masa de lucru	C'	H'	N'	O'	S' <sub>0</sub>	S'	A'	W' <sub>h</sub>	W' <sub>i</sub>	$c' + h' + n' + o' + s'_0 + s' + a' + w'_h + w'_i = 1$
Masa uscată la aer	C <sup>u</sup>	H <sup>u</sup>	N <sup>u</sup>	O <sup>u</sup>	S <sup>u</sup> <sub>0</sub>	S <sup>u</sup>	A <sup>u</sup>	W <sup>u</sup> <sub>h</sub>		$c^u + h^u + n^u + o^u + s_0^u + s^u + a^u + w_h^u = 1$
Masa anhidră	C <sup>anh</sup>	H <sup>anh</sup>	N <sup>anh</sup>	O <sup>anh</sup>	S <sup>anh</sup> <sub>0</sub>	S <sup>anh</sup>	A <sup>anh</sup>			$c^{anh} + h^{anh} + n^{anh} + o^{anh} + s_0^{anh} + s^{anh} + a^{anh} = 1$
Masa combustibilă	C <sup>mc</sup>	H <sup>mc</sup>	N <sup>mc</sup>	O <sup>mc</sup>	S <sup>mc</sup> <sub>0</sub>	S <sup>mc</sup>				$c^{mc} + h^{mc} + n^{mc} + o^{mc} + s_0^{mc} + s^{mc} = 1$
Masa organică	C <sup>o</sup>	H <sup>o</sup>	N <sup>o</sup>	O <sup>o</sup>	S <sup>o</sup> <sub>0</sub>					$c^o + h^o + n^o + o^o + s_0^o + s^o = 1$

##### 1.3.4.1.1 Masa combustibilă

Masa combustibilă reprezintă masa elementelor care participă în procesul de ardere, dar conține și sulful mineral, necombustibil, sub formă de sulfuri și azot.

- carbonul se găsește în combustibili în proporția cea mai mare (30 - 85%), fiind elementul principal al masei combustibile. Prin ardere completă carbonul degajă 33,83 MJ/Kg;
- hidrogenul se găsește sub formă de combinații cu carbonul (în hidrocarburi, până la 25%). Prin ardere, produce 120,1 MJ/Kg;
- oxigenul se găsește în cantități variabile (între 2% în antracit și 44% în lemn). Prezența lui scade valoarea combustibilului, deoarece se găsește în combinație cu carbonul și hidrogenul și astfel, o parte din aceste elemente combustibile sunt deja oxidate;

- azotul se găsește în cantități mici. Inactiv pentru ardere, el se încălzește în timpul procesului de ardere, preluând căldura de la elementele care degaja căldură prin ardere, fiind astfel, un element ce înrăutățește calitatea combustibilului, reducându-i căldura de ardere.
- sulful se găsește sub forma unor compuși combustibili sau necombustibili, în cantități variabile, între 0,1 – 7%. Prin ardere, sulful produce 9,25 MJ/Kg.

#### 1.3.4.1.2 Masa minerală necombustibilă

Masa minerală necombustibilă micșorează valoarea combustibilului, îngreunând și scumpind manipularea și transportul. Prin încălzire, masa minerală necombustibilă se transformă în cenușă și zgură. După ardere, prin depunere, cenușa și zgura reduc transferul de căldură de la gazele de ardere la suprafețele de schimb de căldură, producând totodată și erodarea acestora.

Combustibilii solizi au cel mai mare conținut de materie minerală necombustibilă (7 - 80%).

Masa minerală necombustibilă este alcătuită din silicați, sulfiți, carbonați (de calciu  $\text{CaCO}_3$ ; de magneziu  $\text{MgCO}_3$ ; de fier  $\text{FeCO}_3$ ), sulfați (de calciu  $\text{CaSO}_4$ ; de magneziu  $\text{MgSO}_4$ ), oxizi metalici, fosfați, clorați, săruri ale metalelor alcaline ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ), etc.

Cenușa reprezintă substanțele minerale necombustibile rămase după arderea combustibilului și nu corespunde, nici din punct de vedere calitativ, nici cantitativ, cu masa minerală necombustibilă, deoarece prin arderea combustibilului apar o serie de transformări chimice, ca de exemplu:

- unele minerale (argilele, ghipsul, limonitele) își pierd apa de cristalizare;
- la  $T > 400^\circ\text{C}$  ( $673^\circ\text{K}$ ), protoxidul de fier ( $\text{FeO}$ ) se transformă în oxid feric ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ );
- la  $T > 570^\circ\text{C}$  ( $843^\circ\text{K}$ ), sulfurile de fier (pirite,  $\text{FeS}_2$ ) ard formând oxid feric ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) și dioxid de sulf (anhidrida sulfuroasă,  $\text{SO}_2$ );
- la  $T > 600^\circ\text{C}$  ( $873^\circ\text{K}$ ), carbonatul de calciu (calcar,  $\text{CaCO}_3$ ) se descompune în oxid de calciu (var nestins,  $\text{CaO}$ ) și dioxid de carbon (anhidridă carbonică,  $\text{CO}_2$ );
- anhidrida sulfuroasă ( $\text{SO}_2$ ), formată prin oxidarea piritelor ( $\text{FeS}_2$ ) și a sulfurii organice ( $\text{S}$ ), reacționează cu carbonatul de calciu (calcar,  $\text{CaCO}_3$ ) și cu oxigen ( $\text{O}_2$ ), formând sulfat de calciu ( $\text{CaSO}_4$ ) și dioxid de carbon (anhidrida carbonică,  $\text{CO}_2$ );
- la  $T > 1000^\circ\text{C}$  ( $1273^\circ\text{K}$ ), sulfatul de calciu ( $\text{CaSO}_4$ ) se descompune în oxid de calciu (var nestins,  $\text{CaO}$ ) și trioxid de sulf (anhidridă sulfurică,  $\text{SO}_3$ );
- la  $T > 900^\circ\text{C}$  ( $1173^\circ\text{K}$ ), clorurile alcaline (clorura de sodiu,  $\text{NaCl}$ ; clorura de potasiu,  $\text{KCl}$ ) se volatilizează;
- humații diferitelor metale se descompun, pierzând partea organică;
- oxizii proveniți din argilă, pirită, cuarț formează prin reacții la temperaturi ridicate, aluminați și silicați.

Tabel 5. Compoziția medie a masei organice convenționale pentru diverși combustibili solizi [% masice]

Combustibil	C	H	O	N
Lemn	12...50	1.3...6	11...40	0.1...1
Cărbuni humici				
Turbă	53 ... 60	6 ... 5,5	30 ... 33	2
Cărbune brun	62 ... 79	6 ... 4	27 ... 17	1,5
Huilă	75 ... 83	6 ... 5	9 ... 7	1,7
Huilă antracitoasă	83 ... 90	5 ... 4	7 ... 5	1,7
Antracit	93 ... 97	3 ... 1	3 ... 1	0,8
Cărbuni sapropelici				
Cărbune "boghead"	74 ... 77	11 ... 10	14 ... 12	0,3
Șisturi combustibile	60 ... 75	10 ... 8	10 ... 8	0,3 ... 1,2
Țiței	85 ... 87	13 ... 11	2 ... 0,5	0,05 ... 0,2

În afara acestor componente, masa minerală necombustibilă mai conține urme (0,002 - 0,07%) din diverse elemente ca: Ge (germaniu), V (vanadiu), Co (cobalt), Ni (nichel), Cu (cupru), Ag (argint), Cr (crom), B (bor), Mo (molibden), As (arseniu), Be (beriliu), Bi (bismut), Ti (titan), Pb (plumb), Sn (staniu), Zn (zinc), Se (seleniu), Mn (mangan), Au (aur) și uneori U (uraniu) și Th (toriu); aflate în cenușă sub formă de oxizi, unele din ele putând prezenta importanță industrială.

O categorie aparte de combustibili o formează explozivii. Aceștia se prezintă de obicei în formă solidă dar pot exista și în formă lichidă. Ei conțin în structura lor sub formă de combinații chimice oxigenul necesar arderii, ei putând arde chiar și în spații complet lipsite de oxigen.

Explozivii sunt stabili doar la temperaturi normale, dar pot fi scoși ușor din echilibru cu creșterea temperaturii. Ei se caracterizează prin viteze de ardere ridicate.

O altă clasificare a combustibililor solizi se poate efectua în funcție de compoziția elementară raportată la diferitele metode de analiză a acestor combustibili (Tabel 6).



Tabel 6. Compoziția elementară a combustibililor solizi raportată la diferitele metode de analiză

Combusutibil brut	Carbune proaspat, lemn verde, deseuri neprelucrate							
Compozitia combustibilului	Masa combustibila					Balast		
						Masa minerala necombustibila	Umiditatea totala [Wt]	
Uscare in aer liber	Masa combustibila uscata in aer liber							
Uscare la 105°C	Masa combustibila fara umiditate					Masa minerala necombustibila	Umiditatea higroscopica [Wh]	
	Masa combustibila							
Incalzire la 850°C fara aer	Materia volatila [V]					Cocs		Umiditatea totala [Wt]
Ardere completa la 850°C						Carbon fix	Cenusa [A]	
Analiza chimica elementara	Sulf [S]	Azot [N]	Oxigen [O]	Hidrogen [H]	Carbon total [C]			

### 1.3.4.2 Cărbunii naturali

Cei mai utilizați combustibili solizi sunt cărbunele și lemnul.

Cărbunele poate să fie natural (extras din scoarța pământului) sau fabricat (cocs, semicocs, mangal, brichete).

Cărbunii naturali se împart în trei mari categorii:

- cărbuni humici (provin din carbonizarea plantelor din diferite ere geologice – turbe, cărbuni brunii, huile, antraciți),
- cărbuni sapropelici (provin din alge, mâl sapropelic),
- cărbuni liptobiolitici (provin din carbonizarea plantelor rășinoase și ceroase).

Din punct de vedere al vârstei chimice, cărbunii sunt de patru tipuri.

- turba, un cărbune relativ tânăr, la care procesul de carbonificare este numai parțial realizat. Fiind formată în regiunile mlăștinoase, din plantele de baltă, turba conține o mare cantitate de oxigen și umiditate.

Culori: galben deschis până la brun-negru. În stare uscată, fiind foarte poroasă, turba are o densitate redusă.

- cărbunii bruni sunt cărbuni a căror formare a început în paleogen, la începutul erei terțiare. Aceștia conțin multă umiditate și cenușă, ard cu flacăra, iar prin distilare uscată se obține gaz combustibil.

Culori : castaniu sau brun deschis până la negru.

- cărbune brun pământos, cu aspect sfărâmicios, ca pământul, fără structură vegetală, culoare brun închis;
- cărbune brun lemnos (lignit), cu aspect de fibră lemnoasă și uneori cu conținut ridicat de xilită (rest de lemn incomplet carbonificat), culoare galben-brun până la negru. Este cel mai răspândit cărbune;
- cărbune brun mat, cu aspect mat, pietros, culoare brun-negru;
- cărbune brun cu luciu cu aspect de smoală;
- cărbune brun huilos face tranziția între cărbunii bruni și huile; de culoare neagră cu fâșii alternative lucioase și mate.
- huilele sunt cărbuni a căror formare a început în prima parte a perioadei jurasice din era secundară. Se împart în următoarele grupe:
  - huila cu flacăra lungă, de culoare neagră, cu fâșii alternative lucioase și mate;
  - huila pentru gaz, de culoare neagră, cu stratificare puțin clară, lucioasă;
  - huila grasă, de culoare neagră, cu luciu puternic, de cele mai multe ori sfărâmicioasă și prăfoasă;
  - huila pentru cocs, ca și huila grasă;
  - huila slabă degresantă, ca și huila grasă;
  - huila antracitoasă face tranziția între huile și antraciți; de culoare neagră, de obicei sfărâmicioasă.
- antracitul de culoare negru, cu luciu metalic; de obicei sfărâmicios, este cel mai vechi cărbune natural, a cărui formare a început în perioada carboniferă din era primară.

Datorită caracteristicilor energetice slabe, turba și cărbunele brun fac parte din grupa combustibililor inferiori.

O altfel de analiză care se poate efectua asupra unui combustibil este analiza imediată:

$$C_f + v + w + a = 1$$

Materiile volatile (v) reprezintă gazele degajate la încălzirea combustibilului fără să se țină seama de vaporii de apă (w).

În cazul în care din combustibil se îndepărtează elementele volatile și vaporii de apă, se obține cocsul care este format din cărbunele fix ( $C_f$ ) și cenușă (a).

### **1.3.4.3 Caracteristici pentru combustibilii solizi**

a) Conținutul de materii volatile este constituit din gazele degajate din cărbune când este încălzit; în materiile volatile neincluzându-se și vaporii de apă rezultați din această încălzire.

Conținutul de materii volatile are o mare influență asupra procesului de ardere. Cu cât acesta este mai mare cu atât:

- cărbunele se aprinde mai ușor, la o temperatură mai mică,
- arderea decurge mai repede,
- flacăra este mai lungă,
- luminozitatea flăcării este mai intensă.

Conținutul de materii volatile depinde de vârsta combustibilului. Cărbunile mai tânăre conțin mai multe materii volatile decât cel bătrân (De exemplu, turba conține 70% materii volatile, iar antracitul numai 15 - 20%).

b) Conținutul de umiditate ( $W$ ) exprimă cantitatea de apă conținută în combustibil.

Umiditatea preia, ca și azotul, o parte din căldura degajată prin arderea combustibilului, pentru a se încălzi și pentru a se vaporiza.

În acest fel, accesul oxigenului spre zona de reacție este îngreunat, iar prin formarea vaporilor de apă se mărește volumul gazelor de ardere și se reduce temperatura acestora.

Reprezentând o parte din masa combustibilului, umiditatea mărește cheltuielile de transport și de manipulare și provoacă dificultăți în instalațiile ce realizează aceste operații, în special iarna, când umiditatea din combustibil va îngheța.

Umiditatea poate fi:

- umiditate de îmbibație -  $W_i$  (externă, superficială, de zăcământ), provenind din apa amestecată mecanic cu cărbunile;  
Poate fi eliminată prin uscare în aer liber până la greutate constantă sau în etuvă, la temperatură maximă de 45°C, este acea umiditate pe care o degajă combustibilul prin uscare la aer;
- umiditate higroscopică -  $W_h$  (internă, intrinsecă, coloidală), conținută în structura cărbunelui și a masei minerale, este acea umiditate care rămâne în combustibil după uscarea la aer;  
Poate fi eliminată prin uscare la 105°C (378K) sau prin fierbere cu un solvent;
- umiditatea totală -  $W_t$  (suma celor două componente), acea umiditate cu care combustibilul intră în instalația de ardere.

Cea mai ușoară metodă de îmbunătățire a calității combustibilului este uscarea lui parțială, înainte de ardere, cu ajutorul gazelor de ardere din focar.

c) Conținutul de cocs ( $K$ ) reprezintă partea din cărbune care rămâne în procesul de ardere după degajarea materiilor volatile și a vaporilor de apă. Cocsul are două componente:

- Carbon fix - reprezintă cota parte din cocs care rămâne după dispariția umidității, a volatilelor și a cenușii;
- Conținutul de cenușă ( $A$ ) - reprezintă masa minerală rămasă după arderea combustibilului solid sau lichid.

Cantitatea mare de cenușă a combustibilului scade valoarea energetică a cărbunelui, îngreunează arderea, iar evacuarea cenușii din cazan contribuie la scăderea randamentului acestuia.

Componentele cenușii ( $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $FeO$ , carbonați, pirite) se topesc la temperaturi diferite și, în funcție de ponderea uneia sau altele din componente în amestec, rezultă temperatura de topire a cenușii.

Aceasta are o importanță deosebită în cazul arderii combustibililor în cazane, deoarece cenușa topită prin solidificare se transformă într-o substanță dură, de consistență sticloasă, care se depune pe suprafețele schimbătoare de căldură îngreunând transferul termic, precum și evacuarea gazelor către exterior. Substanța astfel formată se numește zgură.

d) Conținutul de sulf ( $S$ ) reprezintă cantitatea de sulf conținută în cărbune, care se prezintă sub formă de sulfuri și sulfuri.

Sulfurile ard rezultând în gazele de ardere dioxidul și trioxidul de sulf ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ).

A doua componentă (sulfații), nu este combustibilă. Sulfații se regăsesc în cenușa evacuată. Componentele gazoase apărute ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ) se combină cu apa condensată din gazele de ardere, rezultând acid sulfuric ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), care corodează suprafețele metalice finale ale cazanului. Condensarea vaporilor de apă se produce la ieșirea gazelor din cazan, acolo unde temperatura acestora este mai scăzută (temperatura de rouă acidă).

Prezența sulfului este nedorită în combustibili, deoarece prin ardere produce oxizii:  $\text{SO}_2$  și  $\text{SO}_3$ , care sunt toxici pentru viețuitoare, iar prin combinare cu apă ( $\text{H}_2\text{O}$ ), formează acizi corozivi pentru părțile metalice ale cazanelor (acid sulfuros -  $\text{H}_2\text{SO}_3$  și acid sulfuric -  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Cu cât conținutul de sulf este mai mic, cu atât combustibilul este considerat de calitate mai bună.

Sulful combustibil ( $S_c$ ) este format din sulful organic ( $S_o$ ) și sulful din sulfuri (pirită  $\text{FeS}_2$ ,  $S_s$ ). Sulful necombustibil este sulful din sulfați ( $SSO_4$ ).

Sulful total ( $S_t$ ) este format din sulful combustibil și sulful din sulfați:

$$S_t = S_c + SSO_4 \text{ [%]}$$

e) Granulația este o caracteristică a cărbunelui care urmează a fi ars și arată intervalul în care se pot afla dimensiunile particulelor de combustibil.

f) Unghiul taluzului natural reprezintă unghiul pe care îl face panta cea mai înclinată a stivei de cărbune aruncat în mod natural, pe un plan orizontal.

După mărimea granulației și sortimentului de cărbune, acest unghi variază între  $32^\circ$  -  $45^\circ$  și are o importanță deosebită pentru stivuirea și manipularea acestuia pe benzile transportoare, precum și pentru alunecarea în interiorul buncărului de cărbune brut.

g) Exfolierea exprimă proprietatea cărbunelui de a se fărâmița datorită uscării în depozit. Este importantă în calcularea duratei maxime de stocare a cărbunilor.

h) Autoaprinderea reprezintă proprietatea cărbunelui de a se aprinde în depozit fără existența unei surse exterioare de energie.

Cauza autoaprinderii o constituie fixarea oxigenului din aer de către cărbune. Ca urmare a acestui fenomen, temperatura în interiorul haldei de cărbune crește treptat și acesta se autoaprinde. Apar astfel, în interiorul stivei, zone cu cărbune degradat prin ardere, care nu mai posedă puterea calorică inițială. Pentru urmărirea temperaturii în interiorul stivei de cărbune se introduc periodic termometre, iar atunci când aceasta depășește o anumită limită se iau măsuri adecvate.

## **1.4 Căldura de ardere inferioară. Căldura de ardere superioară**

### **1.4.1 Definiție**

Indiferent de tipul combustibilului, una din caracteristicile de bază este căldura de ardere (denumită impropriu putere calorică sau putere calorifică).

Energia termică produsă în procesul de ardere se regăsește atât în gazele de ardere cât și în vaporii de apă rezultați în urma vaporizării apei existente în combustibil și a apei rezultate în urma arderii hidrogenului din combustibil.

De mai sus rezultă, că o parte din căldura de ardere nu va contribui la ridicarea temperaturii gazelor de ardere, ci la vaporizarea apei. Acesta este considerentul care a dus la definirea a două noțiuni de căldură de ardere.

- a. Căldura de ardere superioară se definește ca fiind căldura obținută prin arderea completă a unei cantități unitare de combustibil (1kg pentru combustibili în stare solidă și lichidă,  $1\text{m}^3_N$  pentru combustibili în stare gazoasă), la care gazele de ardere sunt răcite până la  $20^\circ\text{C}$ , în care vaporii de apă din gazele de ardere vor condensa cedând căldura latentă de condensare (egală cu căldura latentă de vaporizare consumată la ardere).
- b. Căldura de ardere inferioară reprezintă energia termică degajată prin arderea completă a unei cantități unitare de combustibil la care gazele de ardere sunt evacuate la o temperatură mai mare de  $100^\circ\text{C}$ , căldura conținută în vaporii de apă pierzându-se în atmosferă.

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

- dioxid de carbon ( $\text{CO}_2$ ),
- azot ( $\text{N}_2$ ), apă ( $\text{H}_2\text{O}$ ),
- monoxid de carbon ( $\text{CO}$ ), oxizi de azot ( $\text{NO}_x$ )
- dioxid de sulf ( $\text{SO}_2$ ) (în cazul utilizării combustibililor solizi).

În gazele de ardere se întâlnește și funingine (care de fapt reprezintă particule neare de carbon).

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  $\text{CO}$ ), atunci arderea este denumită perfectă, sau teoretică.

În cazul contrar, atunci când gazele de ardere conțin particule mecanice combustibile (C), arderea este denumită incompletă mecanic, sau incompletă chimic atunci când gazele de ardere conțin gaze combustibile (de exemplu,  $\text{CO}$ ).

#### **1.4.2 Determinarea experimentală a căldurii de ardere. Bomba calorimetrică**

Căldura de ardere se poate determina fie experimental, într-o instalație denumită bombă calorimetrică (Fig. 1), fie prin calculul aproximativ, cunoscând elementele combustibile, valorile căldurilor de ardere ale acestora și participațiile masice, respectiv volumice ale acestora.

Determinarea experimentală furnizează valoarea reală a căldurii de ardere a combustibilului.

Proba combustibilă a cărei căldură de ardere urmează să fie măsurată se pune într-un creuzet de oțel, după care se introduce în corpul bombei calorimetrice. Un fitil din fir de bumbac va înfășura proba de combustibil și un fir rezistiv din oțel. Capetele firului de oțel sunt conectate la electrozii pentru aprindere care vor induce scânteia ce aprinde proba.

Înainte de executarea montajului de mai sus, se măsoară masa probei de combustibil de analizat, a firului de bumbac și a firului de oțel.

În bombă se introduce oxigen la presiune ridicată (15-30bar). Bomba calorimetrică se imersează în apă, care se găsește la temperatura încăperii unde se efectuează măsurarea, într-un vas izolat (cantitatea de apă din vasul izolat a fost măsurată cu precizie înainte de măsurare).

Se citește temperatura apei din vasul izolat cu ajutorul termometrului imersat în aceasta, și se așteaptă stabilizarea acesteia.

În acest moment, se alimentează circuitul electric, firul din oțel va genera un arc electric, care va aprinde fitilul de bumbac și acesta ajutat de atmosfera bogată în oxigen va aprinde proba de combustibil.

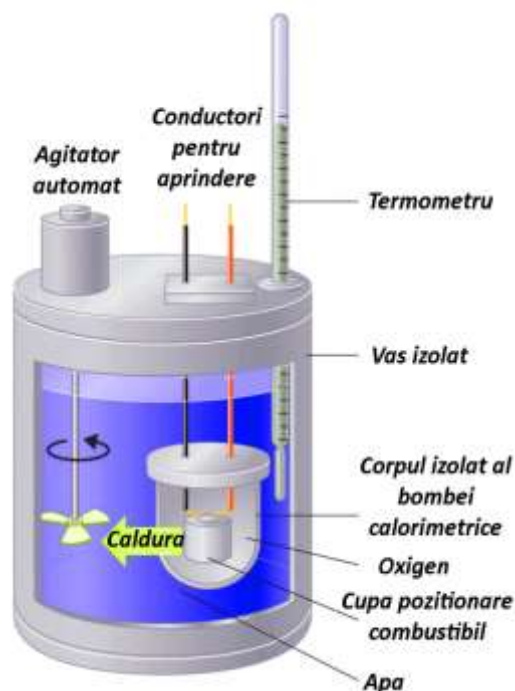


Fig. 1 Măsurarea căldurii de ardere prin utilizarea unei bombe calorimetrice (după [2])

Combustibilul va arde complet, reacția fiind evident una exotermă. Căldura generată în urma arderii va fi absorbită de apa din vasul izolat.

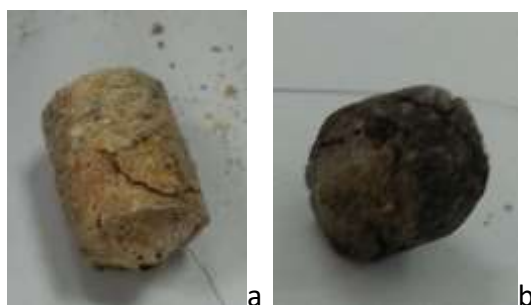


Fig. 2 Probe de combustibil pentru analizat în bomba calorimetrică (~2g)  
a. pelete din rumeguș b. pelete din semințe de floarea soarelui



Fig. 3 Măsurarea căldurii de ardere superioare  
stânga: montaj experimental bombă calorimetrică,  
dreapta: imagine cu bomba calorimetrică imersată în apă în vasul izolat

Temperatura apei se citește din nou, la intervale regulate, până ce aceasta rămâne constantă. Datorită transferului de căldură de la bomba calorimetrică la apa din vasul izolat, temperatura în bomba calorimetrică a scăzut la o valoare care a permis condensarea apei rezultate în urma arderii.

În acest mod, prin utilizarea bombei calorimetrice, se măsoară valoarea căldurii de ardere superioare.

Cunoscându-se capacitatea calorică a bombei calorimetrice și a apei, precum și diferența de temperatură măsurată a apei din vasul izolat între finalul și începutul experimentului (temperatura este măsurată cu o precizie de 0.005°C), cantitatea de căldură generată de arderea probei de combustibil se poate calcula, de aici rezultând valoarea căldurii de ardere superioare pentru combustibilul analizat.

Prin măsurarea cantității de apă din proba de combustibil înainte de măsurare, se poate calcula valoarea căldurii de ardere inferioare.

Calculul pentru determinarea căldurii de ardere inferioare și superioare

Căldura inferioară de ardere a combustibililor solizi și lichizi se poate estima cu următoarea relație:

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

unde  $c, h, o, s, w$  reprezintă participațiile masice în combustibil pentru carbon, hidrogen, oxigen, sulf și apă.

Se observă că prezența oxigenului în combustibil duce la scăderea căldurii de ardere inferioare a combustibilului, deoarece se consideră că se găsește în combinație hidrogenul și astfel, o parte din aceste elemente combustibile sunt deja oxidate.

Căldura inferioară de ardere a combustibililor gazoși se poate estima cu următoarea relație:

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

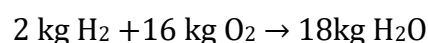
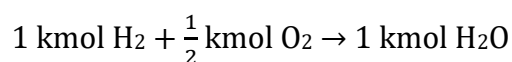
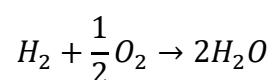
unde  $(co), (h_2), (ch_4)$  reprezintă participațiile volumice în combustibil pentru elementele combustibile gazoase.

Relația de legătura dintre căldura inferioară de ardere și căldura superioară de ardere este:

$$H_s = H_i + 2510(w + 9h) \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Valoarea căldurii de ardere superioare se obține adunând la valoarea căldurii de ardere inferioare, energia care se obține din condensarea apei din combustibil și a apei produsă în timpul arderii prin oxidarea hidrogenului.

Termenul  $9h$  din relația de calcul a căldurii de ardere superioare provine din:



de unde rezultă că prin oxidarea completă a unui kilogram de hidrogen rezultă 9 kilograme de apă.

## 1.5 Indicele Wobbe

Deși pentru caracterizarea unui combustibil gazos cel mai important parametru este valoarea căldurii de ardere inferioare și superioare pentru acest combustibil, probabil cel mai folosit este indicele Wobbe.

Considerând un arzător de gaz (Fig. 4):



Fig. 4 Schemă arzător pentru combustibili gazoși

Fluxul de căldură care se obține la arderea unui combustibil gazos se poate calcula cu relația următoare:

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot H_i \text{ [kW]}$$

unde  $\dot{V}$  este debitul volumic în condiții normale,  $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$ ;

$H_i$  reprezintă căldura de ardere inferioară a combustibilului gazos,  $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$ .

$$\dot{V} = w \cdot S$$

unde  $w$  este viteza medie de curgere a combustibilului gazos, [m/s];

$S$  este aria secțiunii de curgere,  $[\text{m}^2]$ .

Conform ecuației lui Bernoulli, rezultă:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho w^2 \rightarrow w = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

De unde rezultă:

$$\dot{Q} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \cdot S \cdot H_i$$



În condițiile în care se schimbă combustibilul gazos pentru același arzător (aceeași arie de curgere și aceeași cădere de presiune), atunci fluxul de căldură produs de arzător va fi proporțional cu:

$$\dot{Q} \propto \frac{H_i}{\rho} \propto \frac{H_i}{\rho_r}$$

unde  $\rho_r$  reprezintă densitatea relativă  $\rho_r = \frac{\rho_{gaz}}{\rho_{aer}}$

Din acest ultim termen derivă indicele Wobbe. Acesta este un indicator pentru interschimbarea combustibililor gazoși.

$$I_W = \frac{H_i}{\sqrt{\rho_r}}$$

În cazul în care doi combustibili au același indice Wobbe pentru aceeași presiune și deschidere a supapei de ieșire, energia va fi, de asemenea, identică. De obicei, sunt permise variații de până la 5%, deoarece acestea nu sunt vizibile pentru consumator.

Din Tabel 7 se observă că valoarea indicelui Wobbe pentru GPL este cu 66.8% mai mare decât pentru gazul metan.

Acest fapt implică ca în cazul interschimbării acestor doi combustibili gazoși să fie necesară atât schimbarea duzelor prin care curge combustibilul gazos (diametrul duzelor pentru GPL va fi mai mic decât al duzelor pentru gazul metan), cât și al presiunii cu care combustibilul intră în arzător (GPL - 30mbar, gaz metan - 20mbar).

Tabel 7. Valori ale indicelui Wobbe pentru diverși combustibili gazoși

<i>Combustibil gazos</i>	Valoarea superioară a indicelui Wobbe MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	Valoarea inferioară a indicelui Wobbe MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Hidrogen	48.23	40.65
Metan	53.28	47.91
Etan	68.19	62.47
Gaz natural	53.71	48.52
Propan	81.07	74.54
Propilenă	77.04	71.88
n-butan	92.32	85.08
Izobutan	91.96	84.71
GPL	86.84	79.94
Acetilenă	61.32	59.16
CO	12.80	12.80

## 1.6 Combustibilul convențional

Deoarece căldurile de ardere ale combustibililor variază în limite destul de largi, s-a introdus noțiunea de **combustibil convențional**. Acesta este un combustibil etalon, fictiv, care are căldura de ardere inferioară de 29.300 kJ/kg sau kJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub> (7000 kcal/kg).

Cantitatea de combustibil convențional ( $G_{cc}$ ) corespunzătoare unei cantități dintr-un combustibil oarecare se determină astfel:

$$G_{cc} = \frac{G \cdot H_i}{29300} [kg, m_N^3]$$

unde  $G_{cc}$  reprezintă masa sau volumul combustibilului care se evaluează, raportat la cel convențional.

Totodată, se utilizează și noțiunea de **tonă echivalentă de țiței (toe - tonnes of oil equivalent)**.

Prin convenție, această mărime este echivalentă cu cantitatea aproximativă de energie care poate fi extrasă dintr-o tonă de țiței.

Tabel 8 Echivalența toe pentru diferiți combustibili

Combustibilul	Tone echivalență de țiței [toe]
1 tonă diesel	1.01 toe
1 m <sup>3</sup> diesel	0.98 toe
1 tonă benzină	1.05 toe
1 m <sup>3</sup> benzină	0.86 toe
1 tonă biodiesel	0.86 toe
1 m <sup>3</sup> biodiesel	0.78 toe
1 tonă bioetanol	0.64 toe
1 m <sup>3</sup> bioetanol	0.51 toe

Tona echivalentă de țiței este o unitate standardizată, căreia i se atribuie o căldură de ardere inferioară cu valoarea de 41868 de kJ/kg și care a fost introdusă în același scop ca și combustibilul convențional, și anume pentru a facilita compararea energiei obținute din surse diferite.

De exemplu, raportarea Eurostat pentru consumul intern brut de energie primară pentru țările din Europa pe o perioadă de 13 ani (2001-2012) poate fi observată în Tabel 9.

## 1.7 Exergia combustibililor

Calitatea energiei dintr-un sistem se măsoară prin cantitatea de exergie din sistem.

Exergia sau energia cu capacitate nelimitată de transformare este cantitatea maximă de energie care se poate transforma în orice altă formă de energie în următoarele condiții:

- stare determinată a mediului ambiant
- reversibilitate totală a proceselor de transformare.

De exemplu energia electrică este formată integral din exergie (anergia este nulă), iar în condiții ideale este reversibilă integral în alte forme de energie.

Din punct de vedere al exergiei combustibililor, se pot defini exergia fizică și exergia chimică.

Exergia fizică are valoarea diferită de 0 dacă parametrii combustibilului diferă de cei ai mediului ambiant (temperatură, presiune, entalpie, entropie).

$$e_{fiz} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Prin experimente s-a determinat că valoarea exergiei chimice poate fi aproximată cu destulă exactitate cu:

$$e_{cs} \approx H_i \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$e_{cs}$  - exergia combustibililor solizi;

$$e_{cL} = 0.975 \cdot H_i \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$e_{cL}$  - exergia combustibililor lichizi;

$$e_{cG} = 0.95 \cdot H_i \left[ \frac{kJ}{m_N^3} \right]$$

$e_{cG}$  - exergia combustibililor gazoși.

Tabel 9. Raportarea Eurostat pentru consumul intern brut de energie primară pentru țările din Europa în mii de tone echivalente de țiței - toe [3]

an	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	procent din consum pe 201 [%]
EU (28 tari)	1766070.8	1760513.5	1797172.0	1818269.0	1825071.2	1831997.6	1803658.4	1799062.2	1695064.3	1759132.6	1699528.4	1682930.5	100%
Belgia	58448.7	56173.7	59360.0	59007.7	58732.9	57530.2	56044.7	59460.8	56612.7	60587.7	59231.1	56329.90	3.35%
Bulgaria	19295.7	18694.6	19296.2	18940.5	19754.1	20398.8	20036.9	19926.5	17504.1	17769.8	19089.9	18233.30	1.08%
Republica Ceha	42181.8	42588.6	44506.9	45628.6	45120.2	46306.2	46297.9	45267.3	42412.7	44727.8	43225.6	42783.50	2.54%
Danemarca	20273.7	19949.9	20776.8	20195.9	19578.5	21064.5	20542.6	20011.2	19186.7	20146.7	18747.5	18140.60	1.08%
Germania	352236.1	344525.2	341495.0	343949.1	341854.5	351651.0	333705.6	337770.3	317157.9	333674.6	317122.6	319451.40	18.98%
Estonia	5197.0	5013.0	5535.3	5665.7	5618.8	5492.4	6156.7	5948.7	5356.8	6157.1	6193.7	6127.00	0.36%
Irlanda	15162.6	15288.4	14910.8	15103.7	15044.4	15530.4	15985.9	15762.8	14794.3	15129.8	13987.5	13847.30	0.82%
Grecia	29109.0	29577.7	30354.8	30846.4	31408.2	31583.6	31519.4	31840.9	30523.1	28772.6	27835.5	27039.80	1.61%
Spania	126873.4	130546.4	135125.3	141177.4	144222.6	144436.7	146284.3	141778.9	130394.9	129868.5	128212.8	127294.90	7.56%
Franta	266700.7	266861.2	271408.6	275508.4	276365.0	272918.3	269939.1	271491.8	259541.1	267121.6	257876.4	258392.60	15.35%
Croatia	7970.0	8256.1	8840.1	8811.6	8934.6	8920.2	9332.6	9062.3	8702.3	8561.2	8530.5	8118.30	0.48%
Italia	174776.2	175505.0	183119.2	185081.9	187488.4	185244.2	183499.1	180547.3	168864.6	174538.5	171780.8	163053.20	9.69%
Cipru	2426.3	2454.5	2656.5	2489.3	2539.2	2634.8	2739.4	2889.4	2813.7	2728.2	2678.5	2509.30	0.15%
Letonia	4141.6	4115.2	4374.2	4488.4	4591.7	4764.3	4886.1	4694.4	4509.4	4765.7	4376.4	4537.60	0.27%
Lituania	8116.9	8687.8	9042.6	9231.9	8709.6	8539.7	9299.0	9273.0	8467.0	6779.5	6999.8	7084.50	0.42%
Luxemburg	3838.4	4004.6	4216.6	4689.6	4795.6	4717.2	4627.2	4626.1	4360.4	4637.0	4559.8	4454.20	0.26%
Ungaria	25842.6	25897.5	26414.7	26175.0	27611.5	27458.8	26825.1	26629.5	25158.7	25810.9	25104.4	23568.90	1.40%
Malta	882.2	825.7	908.2	934.0	972.5	913.5	970.7	968.4	871.0	953.2	932.0	908.50	0.05%
Olanda	77897.0	78207.3	80520.8	81828.9	82289.4	79642.6	82678.2	83511.3	81072.4	86626.3	80249.6	81979.10	4.87%
Austria	30477.4	30795.9	32547.4	33289.2	34352.8	34485.2	34041.2	34318.9	32324.7	34599.8	33649.9	33654.90	2.00%
Polonia	89888.0	88622.5	91653.0	91672.6	92539.5	97193.8	97117.2	98206.7	94744.8	100918.2	101219.9	97974.40	5.82%
Portugalia	25496.0	26568.5	25896.6	26772.7	27475.0	26183.3	26148.2	25416.2	25055.9	24306.4	23596.0	22204.60	1.32%
Romania	37013.2	38440.1	40096.2	39529.2	39206.3	40578.7	40411.5	40276.6	35554.7	35799.6	36558.4	35370.30	2.10%
Slovenia	6773.5	6867.8	6948.4	7160.1	7325.4	7330.4	7334.8	7753.8	7056.2	7226.2	7280.8	7004.50	0.42%
Slovacia	18793.7	18862.3	18777.9	18502.3	19029.2	18872.5	17861.3	18305.0	16779.7	17864.3	17402.4	16701.50	0.99%
Finlanda	33301.5	35084.0	37090.0	37278.5	34526.1	37558.9	37326.8	35909.7	33844.7	37062.3	35485.5	34081.40	2.03%
Suedia	51281.4	51405.4	49944.7	51858.8	50993.3	49579.3	49557.6	49306.4	45454.2	50783.1	49711.7	49790.90	2.96%
Marea Britanie	231676.3	226694.7	231355.2	232451.5	233991.6	230468.0	222489.4	218107.9	205945.5	211215.9	197889.5	202294.10	12.02%

Anexa 1. Temperatura de inflamabilitate pentru diverși combustibili [4]

Combustibili în stare gazoasă (denumirea în limba engleză)	Temperatura de inflamabilitate
Acetaldehyde	-39°C
Acetic acid (glacial)	39°C to 43°C
Acetone	-17°C
Acetyl chloride	5°C
Acetylene	-18°C
Acrolein	-26°C
Acrylonitrile	0°C
Allyl chloride	-32 °C
Ammonia	11°C
Benzene	-11°C
Butane, n-Butane	-60°C
n-Butyl acetate, Butyl acetate	24°C
Butyl alcohol, Butanol	29°C
n-Butanol	35°C
n-Butyl mercaptan	2°C
Butylene, 1-Butylene, 1-Butene	-80°C
Carbon disulfide	-30°C
Carbon Monoxide	-191°C
1-Chloro-1,1-difluoroethane	-65°C
Cyclobutane	-63.9°C
Cyclohexanol	68°C
Cyclohexanone	43.9 - 44°C
Cyclopropane	-94.4°C
Decane	46.1°C
Diborane	-90°C
1,1-Dichloroethane	14°C
1,2-Dichloroethane	13°C
1,1-Dichloroethene	-10°C
Dichlorosilane	-28 °C
Diesel fuel	>62°C
Diethanolamine	169°C
Diethylamine	-23°C to -26°C
Diethyl ether	-45°C
1,1-Difluoroethane	-81.1°C
1,1-Difluoroethylene	-126.1°C
Diisobutyl ketone	49°C
Diisopropyl ether	-28°C
Dimethyl sulfoxide	88 - 95°C
1,4-Dioxane	12°C
Epichlorohydrin	31°C
Ethane	-135 °C
Ethanol, Ethyl Alcohol	12.8°C

2-Ethoxyethanol	43°C
2-Ethoxyethyl acetate	56°C
Ethyl acetate	-4°C
Ethylamine	-17 °C
Ethylbenzene	15-20 °C
Ethylene glycol	111°C
Ethylene oxide	-20 °C
Ethyl Chloride	-50°C
Furan	-36°C
Gasoline (100 Octane)	-40°C
Glycerol	199°C
Heptane, n-Heptane	-4°C
Hexane, n-Hexane	-22°C
Isobutyl alcohol	28°C
Isophorone	84°C
Isopropyl alcohol, Isopropanol	12°C
Kerosene Jet A-1	>38°C
Methyl acetate	-10°C
Methyl Alcohol, Methanol	11°C
Methyl Chloride	-46 °C
Methyl ethyl ketone	-6°C
Methyl mercaptan	-53°C
Mineral spirits	38-43°C
Morpholine	31 - 37.7°C
Naphthalene	79 - 87 °C
Neohexane	-29 °C
Nickel tetracarbonyl	4 °C
Nitrobenzene	88°C
Nitromethane	35°C
Octane	13°C
Pentane	-40 to -49°C
Propyl acetate	13°C
Propylene	-108°C
Pyridine	20
Styrene	31 - 32.2°C
Tetrahydrofuran	-14°C
Toluene	4.4°C
Vegetable oil	327°C
Vinyl acetate	-8 °C
Xylenes	27 - 32°C
m-Xylene	25°C
p-Xylene	27.2°C

Anexa 2. Valori ale căldurii de ardere superioare și inferioare pentru unele elemente combustibile

Combustibilul	Căldura de ardere superioară		Căldura de ardere inferioară	
	kJ/kg	kJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	kJ/kg	kJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
C	33900	-	33900	-
S	9250	-	9250	-
CO	10170	12720	10170	12720
H <sub>2</sub>	141890	12770	120120	10800
H <sub>2</sub> S				23400

Anexa 3. Valori ale căldurii de ardere inferioare pentru diverși combustibili solizi și lichizi

Combustibili solizi	Căldura de ardere inferioară
	[kJ/kg]
Lemn umed	6280 ... 10400
Lemn uscat	12560 ... 16750
Fag, Stejar (w=15%)	~14700 (7550kJ/dm <sup>3</sup> )
Arțar, Mesteacăn (w=15%)	~15100 (6850kJ/dm <sup>3</sup> )
Plop (w=15%)	~14700 (4300kJ/dm <sup>3</sup> )
Pin (w=15%)	~15800 (6100kJ/dm <sup>3</sup> )
Molid, Brad (w=15%)	~16200 (5400kJ/dm <sup>3</sup> )
Peleți	19000
Turbă	6280 ... 14650
Lignit	5020 ... 16800
Cărbune brun	1700 ... 24500
Huilă	20930 ... 29300
Antracit	29300 ... 31400
Cocs	25960 ... 33500
Păcură	32500...41800
Motorină	41500...45000



Anexa 4. Proprietăți termofizice pentru diferite hidrocarburi

Formula chimică	Nume hidrocarbură	Masa	Masa	Presiune	Cp		Căldura de ardere (p=ct)				ρ
		Molară	Specifică		Vapori	Ideal	Lichid	Lichid 25 °C		gaz (cond.normale)	
		M	kg comb / kg apa	kPa	Gaz	la 1 atm	interval	interval	kg/m <sup>3</sup>		
		kg/kmol	20°C	38 °C	kJ/kgK (16 °C)	kJ/kg	kJ/kg	kJ/m <sup>3</sup> N	kJ/m <sup>3</sup> N	kg/m <sup>3</sup>	
CH4	Methane	16.04	0.3		2.206		55,010	49,537	39,057	36,000	0.71
C2H6	Ethane	30.07	0.37		1.717	3.877	51,565	47,148	66,106	60,444	1.282
C3H8	Propane	44.09	0.5	1303.1	1.624	2.479	49,972	45,980	100,444	92,420	2.01
C4H10	Butane	58.12	0.579	355.8	1.637	2.361	49,130	45,343	121,842	112,451	2.48
C4H10	Isobutane	58.12	0.557	497.8	1.62	2.386	49,013	45,227	123,023	113,520	2.51
C5H12	Pentane	72.15	0.626	107.6	1.624	2.269	48,644	44,985			
C5H12	Isopentane (2-methyl butane)	72.15	0.62	140.7	1.604	2.24	48,553	44,894			
C6H14	Hexane	86.17	0.659	34.2	1.616	2.232	48,313	44,736			
C6H14	Isohexane (2,3-dimethyl butane)	86.17	0.662	51	1.583	2.148	48,218	44,641			
C7H16	Heptane	100.2	0.684	11.2	1.612	2.211	48,074	44,559			
C7H16	Triptane	100.2	0.69	23.2	1.595	2.085	47,948	44,436			
C8H18	Octane	114.2	0.703	3.7	1.612	2.19	47,895	44,427			
C8H18	Isooctane (2,2,4-trimethyl pentane)	114.2	0.692	11.9	1.591	2.047	47,813	44,345			
C9H20	Nonane	128.3	0.718	1.2	1.608	2.186	47,755	44,324			
C10H22	Decane	142.3	0.73	0.5	1.608	2.181	47,643	44,241			
C10H22	Isodecane (2,2,4-tetramethyl hexane)	142.3	0.768				47,590	44,217			
C11H24	Undecane	156.3	0.74		1.604		47,550	44,171			
C12H26	Dodecane	170.3	0.749		1.604		47,474	44,115			
C13H28	Tridecane	184.4	0.756		1.604		47,409	44,066			
C14H30	Tetradecane	198.4	0.763		1.599		47,350	44,024			
C15H32	Pentadecane	212.4	0.768		1.599		47,306	43,987			
C16H34	Hexadecane (cetane)	226.4	0.773		1.599		47,292	43,957			
C17H36	Heptadecane	240.5	0.778		1.599		47,222	43,950			
C18H38	Octadecane	254.5	0.782		1.599		47,190	43,903			
C35H72	Pentatriacontane	492.3	0.781				47,102	43,845			
C4H8	Methylcyclopropane	56.1									
C5H10	Cyclopentane	70.13	0.745	68.3	1.135	1.767	46,927	43,789			
C6H12	Cyclohexane	84.16	0.779	22.8	1.214	1.813	46,580	43,440			
C6H12	1,1,2-trimethyl cyclopropane	84.16				1.825					
C7H14	Cycloheptane	98.18	0.816	5.9	1.181	1.838	46,706	43,533			
C8H16	Cyclooctane	112.2	0.841	2.1	1.172	1.717	46,725	43,552			

C6H6	Benzene	78.21	0.879	22.7	1.005		41,835	40,144			
C7H8	Toluene (methyl benzene)	92.13	0.867	7.1	1.089	1.683	42,438	40,528			
C8H10	Ethyl Benzene	106.2	0.867	2.6	1.172	1.721	43,001	40,928			
C8H10	Xylene-m (1,3-dimethyl benzene)	106.2	0.864	2.2	1.164	1.691	42,877	40,805			
C3H6	Propene (propylene)	42.08	0.514	1561	1.482	2.449	48,713	45,538			
C4H8	Butene-1	56.1	0.595	434.4	1.486	2.24	48,211	45,041			
C5H10	Pentene-1	70.13	0.641	131	1.524	2.177	47,892	44,717			
C6H12	Hexene-1	84.16	0.673	41.4	1.532	2.144	47,671	44,501			
C5H8	Isoprene (2-methyl-1,3-butadiene)	68.11	0.687	115.1	1.495	2.198	46,515	43,906			
C6H10	1,5-hexadiene	82.14	0.697	49	1.39	2.135	46,915	44,171			
C5H8	Cyclopentene	68.11	0.767		1.063	1.758	45,757	43,150			
CH <sub>4</sub> O	Methanol	32.04	0.792	31.4			22,725	20,106			
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Ethanol	46.06	0.785	15.5			29,726	26,991			
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	Propanol	60.08	0.799	6.1			33,727	30,936			
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	Butanol	74.1	0.805	2.3			36,053	33,225			
CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	Nitromethane	61.04		96.5			12,002				
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	Nitroethane	75.07		66.9			18,120				

## Anexa 5. Caracteristici fizico-chimice ale lignitului de Rovinari

- umiditatea totală: 40 ÷ 41 %
- cenușa: 24 ÷ 25.5 %
- puterea calorifică inferioară: 7536 ÷ 5861 kJ/kg
- componente volatile în masa brută: 21.4 ÷ 18.6 %
- conținutul de carbon: 21.9 ÷ 18.3 %
- conținutul de hidrogen: 2.0 ÷ 1.7 %
- conținutul de sulf combustibil: 0.8 ÷ 0.7 %
- conținutul de N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> : 10.3 ÷ 8.8 %
- granulația cărbunelui: 0 ÷ 40 mm
  - din care: 85 % 0 ÷ 30 mm
  - 2 % peste 40 mm
- temperatura de înmuiere a cenușii: t<sub>A</sub> = 1200 ÷ 1100 °C
- temperatura de topire a cenușii: t<sub>B</sub> = 1220 ÷ 1140 °C
- temperatura de curgere a cenușii: t<sub>C</sub> = 1250 ÷ 1170 °C

## Anexa 6. Caracteristici fizico-chimice ale păcurii

- conținutul de carbon: 84 ÷ 87.3 %
- conținutul de hidrogen: 10.5 ÷ 11.4 %
- conținutul de oxigen: 1.5 ÷ 1.91 %
- conținutul de azot: 0.12 %
- conținutul de sulf: 2.9 ÷ 3.3 %
- viscozitatea la + 50 °C: 30 °E ÷ 33 °E
- punctul de solidificare: + 15 °C ÷ +30 °C
- conținutul de cenușă: 0.3 ÷ 0.6 %
- conținutul de apă: 0.2 ÷ 1.0 %
- puterea calorifică inferioară: 39775 kJ/kg
- densitatea la + 50 °C: 0.95 ÷ 0.96 kg/dm<sup>3</sup>
- punctul de inflamabilitate: 90 ÷ 170 °C
- conținutul de vanadiu: 80 ppm
- conținutul de sodiu: 7 ÷ 11 ppm
- conținutul de nichel: 25 ÷ 32 ppm
- presiunea păcurii la intrarea în sala cazane: 54 bar
- temperatura păcurii la intrarea în sala cazane: 125 °C
- viscozitatea păcurii la intrare în sala cazane: 2.4 °E

Anexa 7. Compoziția unor gaze naturale din Ardeal

Câmpul de sonde	Compoziția [%] din volum			
	aer	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Sarasău	0.69	98.51	-	0.8
Botorca	0.12	99.88	-	-
Sărmășel	0.7	99.2	0.1	-

Anexa 8. Compoziția unor gaze de sondă din țară

Denumirea gazului	Compoziția [%] din volum						
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	CO <sub>2</sub>
Gaz bogat de Boldești Prahova	78.00	9.24	6.23	3.46	1.10	1.77	0.2
Gaz sărac de Moreni Gura Ocniței	95.93	1.19	1.35	0.73	0.46	0.34	-
Gaz sărac de Mănești Vlădeni	99.80	-	-	-	-	-	0.2
Gaz sărac de Aricești	95.00	2.00	-	-	-	-	3.00

## Referințe bibliografice

1. \*\*\*, EN590. [https://www.dieselnet.com/standards/eu/fuel\\_automotive.php](https://www.dieselnet.com/standards/eu/fuel_automotive.php).
2. \*\*\*, <http://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0m/s09-03-calorimetry.html>.
3. \*\*\*,  
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=ten00086>.
4. \*\*\*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Flammability\\_limit](http://en.wikipedia.org/wiki/Flammability_limit).