

G. IZGARANJE

52. KARAKTERISTIKE GORIVA

Gorivo se najčešće definira kao materija koja s kisikom burno reagira (oksidira, tj. izgara) i pri tome oslobađa svoju kemijski vezanu energiju, koja se prenosi na produkte izgaranja i okolinu. Za praktičnu upotrebu, međutim, gorivo mora biti materija koje u prirodi ima u dovoljnim količinama, mora biti jeftino, izgarati bez štetnih produkata izgaranja itd. Tipična goriva, poznata iz svakodnevne upotrebe, su: drvo, ugljen, nafta, plin, škrljavci, gradski i industrijski otpaci itd. Često se ta goriva grupiraju kao: čvrsta, tekuća i plinovita, što je više važno za tehniku njihovog izgaranja, a manje je važno za termodinamičke procese koji će se u nastavku proučavati.

Kisik potreban za izgaranje goriva najčešće se dobavlja iz zraka, pa bi se gotovo moglo reći da je izgaranje kemijska reakcija goriva i zraka.

Za proučavanje procesa izgaranja potrebno je znati sastav goriva. U tu svrhu obavljaju se tzv. tehnička i elementarna analiza goriva.

Tehničkom analizom ustanovljuju se ove sastavne komponente goriva: vlaga, isparljive izgorive materije, čvrste izgorive materije i pepeo. Vlaga se određuje sušenjem goriva na temperaturi od 105°C. Isparljive izgorive materije dobivaju se žarenjem goriva do 875°C bez prisutnosti zraka. Pepeo, odnosno neizgorive materije u gorivu određuju se žarenjem goriva na temperaturi od 700 do 775°C uz prisutnost zraka. Količina čvrstih izgorivih materija nalazi se kao razlika početne mase goriva i izmjerenih ostalih komponenata.

Elementarna analiza goriva obavlja se kompleksnijim kemijskim metodama, a njome se ustanovljuju ove sastavne komponente goriva:

<i>c</i> [kg/kg]	sadržaj ugljika
<i>h</i> [kg/kg]	sadržaj vodika
<i>s</i> [kg/kg]	sadržaj sumpora
<i>n</i> [kg/kg]	sadržaj dušika
<i>o</i> [kg/kg]	sadržaj kisika
<i>a</i> [kg/kg]	sadržaj pepela
<i>w</i> [kg/kg]	sadržaj vlage

Sasvim prirodno iz same definicije komponenata, mora biti zadovoljena relacija

$$c + h + s + n + o + a + w = 1 \quad (291)$$

Od svih tih komponenata u procesu izgaranja sudjeluju i odaju toplinu *c*, *h* i *s*. Kisik (*o*) potpomaže izgaranje (za istu količinu ga treba manje uzeti iz zraka), a dušik (*n*), pepeo (*a*) i vlaga (*w*) su balast u procesu izgaranja.

Još jedna od bitnih tehničkih karakteristika goriva je temperatura njegovog paljenja. To je, zapravo, ona temperatura kod koje počinje lančani proces izgaranja, tj. brza oksidacija uz intenzivno izdvajanje topline. Za različita goriva i temperature su paljenja različite, što se će ilustrirati s nekoliko primjera:

drvo i drveni ugljen	$\approx 250^{\circ}\text{C}$
mrki ugljen	300–375 $^{\circ}\text{C}$
mazut	350–400 $^{\circ}\text{C}$
metan (CH_4)	650–750 $^{\circ}\text{C}$

53. STEHIOMETRIJSKI ODNOSI IZGARANJA

Mehanizam izgaranja vrlo je kompleksan i nije još dovoljno poznat. Na sreću, međutim, za praktična računanja bitan je odnos početnih i konačnih produkata i efekata izgaranja, koji su dobro poznati kroz mnoge teorijske i eksperimentalne radove. Za svaku izgorivu komponentu, iz elementarne analize goriva razrađene su tzv. stehiometrijske jednadžbe izgaranja.

Prilikom izgaranja ugljika dolazi do njegovog spoja s kisikom iz zraka, pri čemu nastaje ugljik-dioksid i oslobađa se toplina



Ta kemijska formula razrađuje se dalje kao



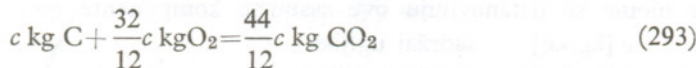
Ako se jednadžba izmnoži sa $6,023 \cdot 10^{26}$ (Avogadrov broj, 11. poglavlje), može se pisati



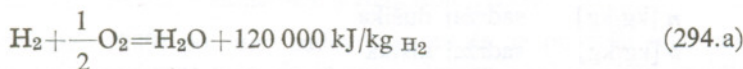
Kad se mase za C, O_2 i CO_2 umjesto u kilomolovima izraze u kilogramima, bit će



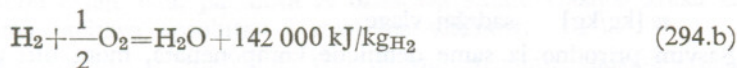
Ako se izraz pomnoži s $c/12$, konačno izlazi



Slično prethodnom, prilikom izgaranja vodika vrijede ove jednadžbe:



ili



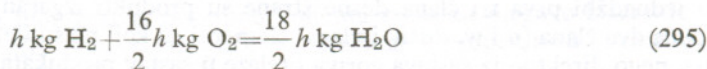
U vezi s prikazanim, različitim toplinama oslobođenim u toku reakcije izgaranja, treba reći da je ovdje riječ o načinu iskorištenja i definiranja te topline. Ako se za proces izgaranja vodika uzima čisti kisik, tad je samo vodena para produkt izgaranja. Dovodeći vodenu paru na stanje okoline, tj. na iste početne uvjete koje

su imali vodik i kisik pred početak reakcije, ona će se ohladiti i kondenzirati pa će oslobođena toplina biti 142 000 kJ/kg. Ako međutim, za proces izgaranja vodika služi kisik iz zraka, tad će u produktima izgaranja osim nastale vodene pare biti i dušik iz zraka. Prilikom hlađenja produkata izgaranja do stanja okoline oslobođena toplina će biti manja jer će jedan dio vodene pare ostati u dušiku jednako kao što je to bilo s vlažnim zrakom. U ekstremnom slučaju, ako bi izgaranje vodika bilo s nekim zrakom jako siromašnim kisikom (ili s velikim suviškom zraka, o čemu će malo poslije biti riječi), produkti bi izgaranja imali jako puno dušika, a u njemu bi zaostala gotovo sva para. U toj krajnjoj prilici para se uopće ne bi kondenzirala, a dobivena toplina bila bi samo 120 000 kJ/kg. Te dvije topline imaju i svoj posebni naziv: gornja ($H_g=142\ 000$ kJ/kg) i donja ($H_d=120\ 000$ kJ/kg) toplinska moć goriva.

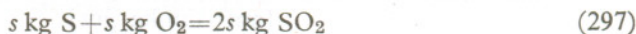
Analogno jednadžbama za izgaranje ugljika, i jednadžbe (294) za izgaranje vodika mogu se izraziti na ove načine:



i konačno



I za treći izgorivi element iz goriva, sumpor (S), analogne jednadžbe glase:



Na osnovi tih stehiometrijskih jednadžbi izgaranja izgorivih komponenata iz goriva, jednostavnim zbrajanjem pronalazi se minimalno potrebna količina kisika:

$$O_{\min} = \frac{32}{12} \cdot c + \frac{16}{2} h + s - o \quad [\text{kg } O_2/\text{kg goriva}] \quad (298)$$

U jednadžbi ($-o$) je količina kisika koja se po elementarnoj analizi već nalazi u gorivu i za toliko je potrebno dovesti manje kisika za izgaranje.

Ako se jednadžba (298) podijeli molekularnom masom kisika ($M_{O_2}=32$) i pomnoži s 22,41 nm³/kmol, dobit će se ista vrijednost, ali izražena u volumnim jedinicama

$$O_{\min} = 1,868 \cdot c + 5,603 \cdot h + 0,700 \cdot s - 0,700 \cdot o \quad [\text{nm}^3 O_2/\text{kg goriva}] \quad (299)$$

Kao što je već napomenuto, za uobičajene procese izgaranja u inženjerskoj praksi služi kisik iz zraka. Budući da ga tu ima 23% po masi ili 21% po volumenu, to minimalno potrebna količina zraka za izgaranje iznosi

$$Z_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,23} = \frac{\text{jednadžba (298)}}{0,23} \quad [\text{kg zr/kg gor}] \quad (300)$$

$$Z_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} = \frac{\text{jednadžba (299)}}{0,21} \quad [\text{nm}^3\text{zr/kg gor}] \quad (301)$$

Osim toga, gorivu se u procesu izgaranja mora dovesti veća količina zraka od minimalne jednostavno zato što je nemoguće do svake čestice goriva dovesti idealnu količinu zraka, pa je

$$Z_{\text{st}} = \lambda \cdot Z_{\min} \quad (302)$$

Pri tome je $\lambda(-)$ tzv. koeficijent suviška zraka i u praksi iznosi od 1,1 do 1,3 pa i znatno više.

Koristeći se i dalje stehiometrijskim jednadžbama izgaranja, a i jednadžbama za potrebnu količinu zraka, određuje se i količina produkata izgaranja (dimnih plinova):

$$V_{\min} = \frac{44}{12}c + \frac{18}{2}h + 2s + n + w + 0,77 \cdot Z_{\min} \quad [\text{kg dim/kg gor}] \quad (303)$$

U jednadžbi prva tri člana desne strane su produkti izgaranja CO_2 , H_2O i SO_2 . Iduća dva člana (n i w , dušik i vlaga) elementi su koji ne sudjeluju u reakciji izgaranja, nego direktno iz sastava goriva prelaze u sastav produkata izgaranja. Posljednji član na desnoj strani označava neminovni sastojak zraka dušik (77%), koji je zajedno s kisikom doveden u proces.

Stvarna količina dimnih plinova kad se proces odvija sa suviškom zraka iznosi

$$V_{\text{st}} = V_{\min} + (\lambda - 1) \cdot Z_{\text{st}} \quad [\text{kg dim/kg gor}] \quad (304)$$

Iste količine izražavaju se i u nm^3 , što analogno opisanom načinu pretvaranja daje

$$V_{\min} = 1,868 \cdot c + 11,205 \cdot h + 0,700 \cdot s + 0,800 \cdot n + 1,245 \cdot w + 0,79 \cdot Z_{\min} \quad [\text{nm}^3 \text{ dim/kg gor}] \quad (305)$$

$$V_{\text{st}} = V_{\min} + (\lambda - 1) \cdot Z_{\text{st}} \quad [\text{nm}^3 \text{ dim/kg gor}] \quad (306)$$

Kod upotrebe posljednjih dviju jednadžbi, Z_{\min} i Z_{st} uvrštavaju se u nm^3/kg , što je i logično.

54. TOPLINSKA MOĆ I TEMPERATURA IZGARANJA

Toplinska moć goriva za praktičnu je upotrebu jedna od najbitnijih njegovih karakteristika. Do pouzdanih podataka o toplinskoj moći dolazi se mjerenjima posebnim napravama — kalorimetrima. Takvim mjerenjima određene su i toplinske moći navedene u jednadžbama (292), (294) i (296). Ako se, međutim, želi izračunati, toplinska moć goriva u kojem ima: c [kg/kg] ugljika, h [kg/kg] vodika, s [kg/kg] sumpora i drugih (uglavnom inertnih) sastojaka, nije dovoljno zbrojiti topline koje

svaki od datih izgorivih sastojaka oslobađa prilikom izgaranja. Naime, kao što je već spomenuto, proces izgaranja vrlo je kompliciran — on teče s nizom međufaza reakcija miješanja, disocijacije itd. Iz tih razloga, jednadžbe za određivanje toplinske moći praktičnih goriva korigiraju se eksperimentalnim podacima.

Najčešći izraz za gornju toplinsku moć goriva je

$$H_g = 33\,900 \cdot c + 142\,000 \cdot \left(h - \frac{o}{8}\right) + 10\,500 \cdot s \quad [\text{kJ/kg}] \quad (307)$$

Kao što se vidi, gornja toplinska moć je uglavnom zbroj toplinskih moći za c , h i s , ali uz izvršenu korekciju s obzirom na tzv. slobodni vodik. Naime, kisik iz goriva (o) najčešće je već vezan, kao H_2O , CO_2 ili slično, pa se odgovarajuće smanjenje toplinske moći najpribližnije izražava preko veze kisika s vodikom, tj. $2M_{\text{H}_2}/M_{\text{O}_2} = 1/8$.

Donja toplinska moć istih goriva, kako je već obrazloženo, manja je od gornje za toplinu kondenzacije vodene pare

$$H_d = H_g - 2\,500 \cdot (9 \cdot h + w) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (308)$$

U jednadžbi w [kg/kg] je količina vlage u gorivu, a $9 \cdot h$ [kg/kg] također je količina vlage, ali nastala izgaranjem h [kg/kg] vodika — jednadžba (295).

Pri praktičnom iskorištavanju goriva u kotlovima, pećima, ložištima itd., dimni plinovi odlaze u dimnjak pri pritisku okoline i s temperaturom višom od 100°C . To praktički znači da je sva vlaga u njima u parnom stanju, pa je donja toplinska moć ona energija s kojom se kod izgaranja i praktički može računati.

Znajući toplinsku moć goriva, potrebnu količinu zraka za njegovo izgaranje i količinu nastalih dimnih plinova, moguće je izračunati temperaturu izgaranja, odnosno temperaturu dimnih plinova.

U stacionarnom procesu, za izgaranje 1 kg goriva kojem je početna temperatura jednaka temperaturi okoline, t_{ok} , treba dovesti količinu zraka Z_{st} koji može biti predgrijan i imati temperaturu t_z . Nastali dimni plinovi, kojih je količina V_{st} , imaju konačnu temperaturu t_t . Osim toga, već u toku procesa izgaranja moguće je odvoditi dio nastale topline, q_{zr} (q_{zr} je ukupno odvedena toplina u kojoj zbog visoke temperature najviše sudjeluje zračenje plamena). Opisana toplinska bilanca za proces izgaranja pri stalnom pritisku piše se kao

$$\begin{aligned} H_d + Z_{st} \cdot c_{p,z} \Big|_{t_{ok}}^{t_z} \cdot (t_z - t_{ok}) = \\ = V_{st} \cdot c_{p,v} \Big|_{t_{ok}}^{t_t} \cdot (t_t - t_{ok}) + q_{zr} \end{aligned} \quad (309)$$

Odatle je temperatura dimnih plinova na izlasku iz ložišta

$$t_t = t_{ok} + \frac{H_d + Z_{st} \cdot c_{p,z} \Big|_{t_{ok}}^{t_z} \cdot (t_z - t_{ok}) - q_{zr}}{V_{st} \cdot c_{p,v} \Big|_{t_{ok}}^{t_t}} \quad (310)$$

U izrazima se specifične topline pri stalnom pritisku za zrak i dimne plinove računaju kao za mješavinu plinova, tj. prema jednadžbi (101). Osim toga, uzimaju se njihove srednje vrijednosti između temperatura t_{0k} i t_z , odnosno t_{0k} i t_t , jer se njihove tekuće vrijednosti znatno mijenjaju s temperaturom. Dalje, budući da je konačna vrijednost za t_t u početku nepoznata, ona se mora pretpostaviti da bi se

izračunalo $c_{p,v}$ $\left| \begin{array}{l} t_t \\ t_{0k} \end{array} \right.$. Kad se zatim izračuna t_t , valja naći novu vrijednost za $c_{p,v}$ pa $\left| \begin{array}{l} t_t \\ t_{0k} \end{array} \right.$

zatim novu vrijednost za t_t i tako nekoliko puta do postizanja željene točnosti.

55. KONTROLA PROCESA IZGARANJA

Izgaranje, kao i svaki drugi stvarni proces u termodinamici, teče s više gubitaka. Tu je u prvom redu gubitak samoga goriva, koje dijelom propada s pepelom, a dijelom se kao čada gubi s dimnim plinovima. Ti se gubici uglavnom svode na ugljik iz goriva (jer su drugi gorivi elementi lakše izgorivi), pa je uobičajeno označavati ovako:

$\alpha \cdot c$ [kg/kg] — količina ugljika koja stvarno izgori

$(1-\alpha) \cdot c$ [kg/kg] — količina ugljika koja se gubi

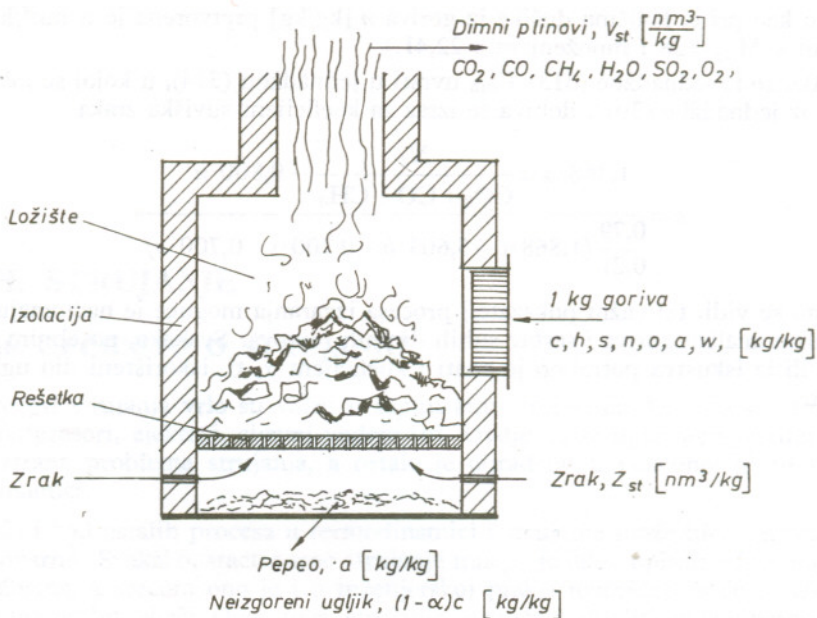
Povezano opet s ugljikom jest i mogućnost njegovog nepotpunog izgaranja — umjesto u CO_2 , izgara on u CO i odaje manje topline. Teorijski postoji mogućnost da neizgorjeni ostanu H_2 , CH_4 i neki drugi gorivi elementi, ali se zbog njihove lakoće izgaranja to rijetko dešava.

Najveći gubitak u procesu izgaranja je toplina samih dimnih plinova, koji odlaze u dimnjak s temperaturom od, recimo, 150°C ili slično. Više je praktičnih razloga da se ne ide na veće iskorištenje topline iz dimnih plinova i time postizanje niže izlazne temperature. Neki od tih razloga su: premala temperaturna razlika između dimnih plinova i (recimo) vode koja se grije pa bi trebala velika površina za razmjenu topline; daljnjim snižavanjem temperature iz dimnih plinova bi se kondenzirala vlaga, a s njom i SO_2 , čime bi nastala sumporasta ili sumporna kiselina, koje vrlo korozivno djeluju na materijale kotla itd. Ako se, međutim, već ne može sniziti temperatura izlaznih plinova, tad se barem nastoji da im količina bude što manja, a to se prema jednadžbi (304) ili (306) postiže izgaranjem uz minimalni suvišak zraka.

Iz toga se lako zaključuje da je kontrola procesa izgaranja bitan preduvjet za njegovo praćenje i optimalno odvijanje. Ne ulazeći u samu tehniku mjerenja pojedinih parametara goriva i dimnih plinova, proces se izgaranja u općem slučaju može prikazati kao na slici 115.

Na slici su s CO_2 , CO itd. označene pojedine komponente u dimnim plinovima, a ujedno su to i volumni udjeli tih komponenata. Budući da se njihovo stvarno određivanje izvodi pri temperaturi okoline, kad je praktički sva vodena para iz dimnih plinova kondenzirala, to su udjeli CO_2 , CO itd. svedeni na 1 nm^3 suhoga dimnog plina, dakle je





Sl. 115. Bilanca materija u stvarnom procesu izgaranja

Sasvim razumljivo, stvarni volumen vlažnih dimnih plinova koji nastaju izgaranjem 1 kg goriva, bit će

$$V_{st} = V_{suh} + (11,205 \cdot h + 1,245 \cdot w) \quad [nm^3/kg] \quad (312)$$

Za prikazani proces izgaranja na slici 155, u stacionarnom stanju, moraju biti zadovoljene ove dvije bilance:

— bilanca ugljika

$$\frac{c}{12} \cdot 22,41 = V_{suh} \cdot (CO_2 + CO + CH_4) - (1 - \alpha) \frac{c}{12} \cdot 22,41$$

odakle je

$$V_{suh} = \frac{1,868 \cdot \alpha \cdot c}{CO_2 + CO + CH_4} \quad [nm^3/kg] \quad (313)$$

(Ulazna količina ugljika c [kg/kg] podijeljena je njezinom molekularnom masom $M_c = 12$ i pomnožena s 22,41 da bi se dobila vrijednost u $[nm^3/kg]$).

— bilanca dušika

$$0,79 \cdot \lambda \cdot Z_{min} + \frac{n}{28} \cdot 22,41 = V_{suh} \cdot N_2$$

odakle je

$$\lambda = \frac{V_{suh} \cdot N_2 - 0,800 \cdot n}{0,79 \cdot Z_{min}} \quad (314)$$

(Slično kao prije, količina dušika iz goriva n [kg/kg] pretvorena je u nm^3/kg dijeljenjem s $M_{\text{N}_2}=28$ i množenjem s 22,41.).

Ako se iz jednadžbe (313) V_{suH} uvrsti u jednadžbu (314), u kojoj se još i Z_{min} uvrsti iz jednadžbe (301), dobiva se izraz za koeficijent suviška zraka

$$\lambda = \frac{1,868 \cdot \alpha \cdot c \frac{N_2}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4} - 0,800 \cdot n}{\frac{0,79}{0,21} (1,868 \cdot c + 5,603 \cdot h + 0,700 \cdot s - 0,700 \cdot o)} \quad (315)$$

Kao što se vidi, taj važni pokazatelj procesa izgaranja moguće je naći znajući elementarnu analizu goriva i sastav suhih dimnih plinova. Svakako, posebnim mjerenjima ili iz iskustva potrebno je znati i koeficijent α , tj. iskorišteni dio ugljika iz goriva.