

1.

Obuhvatnost energetike

Energetika je povezana s fizikalnim, kemijskim i toplinskim pojavama u energetskim procesima, a zahtijeva znanja koja prije svega obuhvaćaju izvore energije te mogućnosti njihove pretvorbe u konačne oblike potrebne potrošačima. U prirodi se procesi ne mogu kontrolirati, oni su spontani (npr. sunce – vjetar – valovi). No, čovjek kontrolira procese pretvorbe na temelju 1. i 2. glavnog zakona termodinamike. Upravo se gospodarenje energijom temelji na inženjerskoj primjeni 2. glavnog zakona u smjeru sniženja gubitaka, pri čemu se ocjenjuje ukupnost oblika i razine energije te određuje učinkovitost potrošnje radi nalaženja mogućnosti optimizacije. U skladu s time, za kontrolirane energetske procese potrebno je obuhvatiti opskrbu, ekonomičnost i diverzifikaciju.

A. Opskrba energijom uključuje primarne oblike, pretvorbe i potrošnju.

Primarni oblici, tj. izvori dijele se na obnovljive i neobnovljive te konvencionalne i nekonvencionalne, a analiziraju se u skladu sa svojstvima, sastavom i raspoloživosti te vrsti energije koju sadržavaju. U odnosu na raspoloživost zalihe se dijele na:

- poznate, koje su utvrđene lokacijski i količinski,
- iskoristive, tj. onaj dio poznatih koji se može primijeniti postojećim tehnologijama,
- moguće, o kojima se zaključuje na temelju istraživanja.

Sve količine energenata koje se mogu dobiti iz prirode (npr. iskop ugljena) nazivaju se resursi. Oni resursi koji se mogu dobiti i ekonomično primijeniti u danom času nazivaju se rezerve.

Pretvorbe, odnosno transformacije u povoljniji oblik moraju se obaviti jer se niti jedan primarni oblik osim vrućih izvora ne može neposredno primijeniti. Prema tome, pretvorbe se obavljaju zbog:

- nemogućnosti primjene u primarnom obliku,
- nemogućnosti transporta (obnovljivi izvori, npr. Sunčeva energija, vjetar ne mogu se transportirati),

- ekonomičnosti (npr. ugljen je jeftiniji u blizini rudnika). Također, mehanička energija pretvara se u električnu i prenosi dalekovodima do stacionarnih potrošača, što je jeftinije.

Struktura potrošnje energije obuhvaća oblike energije (izvori, toplinska energija, električna energija) i vrste potrošača (industrija, promet te ostalo što obuhvaća domaćinstva, poljoprivredu, šumarstvo, građevinarstvo itd.). Općenito, potrošnja se uspoređuje s društvenim proizvodom kako bi se utvrdila učinkovitost upotrebe energije.

B. Ekonomičnost, odnosno učinkovitost obuhvaća energetska područja (izvori, dobivanje i trošenje energije, optimizacija, racionalizacija) te procese (sušenje, destilacija, kompresija, ventilacija, hlađenje). Tu se uključuje racionalizacija uz optimalni izbor izvora i potrošnju energenata. Ovakva racionalizacija provodi se uz zadovoljavanje proizvodnih, ljudskih i ekoloških uvjeta. Ekonomičnost racionalne potrošnje ocjenjuje se usporedbom cijene uštede energije i kvalitete proizvoda te cijene uštedenog goriva i utjecaja na okoliš. Za brzu procjenu ekonomičnosti, tj. uštede u potrošnji primjenjuje se amortizacijski period (engl. *payback period*):

$$Z = \frac{I}{U} = \frac{\text{investicije}}{\text{ušteta}}$$

Z = vrijeme potrebno za povrat investicije (godina).

C. Diverzifikacija, odnosno raznolikost uključuje primjenu alternativnih izvora i njihovu međusobnu zamjenu uz uspješno vođenje procesa. Alternativni izvori mogu biti **obnovljivi** (npr. sunce, vjetar) i **neobnovljivi** (npr. fosilna goriva).

Pritom se fosilna goriva mogu međusobno zamjenjivati, kao npr. zamjena nafte plinom. Zamjena fosilnih goriva alternativnim, obnovljivim izvorima upućuje na njihove prednosti i nedostatke. Obnovljivi izvori su neiscrpn i se tehnički i ekonomski iskoristivi potencijal obnavlja. Također, ekološki su povoljniji i imaju niže pogonske troškove. Međutim, obnovljivi izvori su nepredvidivi te su podložni dnevnim i sezonskim varijacijama. Tu nisu uključene geotermička energija i energija biomase koje variraju samo sezonski. Nadalje, za njihovu pretvorbu potreban je veći prostor i investicije (npr. polje kolektora), što znači da imaju manju energetska gustoću.

1.1. Izvori i pretvorbe oblika energije

Radi cjelovitog uvida u tablici 1 prikazani su najčešći primarni oblici s energijom koju sadržavaju, mogućnosti pretvorbe, odgovarajući uređaji i korisni oblici energije.

Primarni oblici, odnosno izvori javljaju se u prirodi ili se u njoj nalaze, a mogu se podijeliti na nosioce sljedećih oblika energije:

- kemijske – fosilna ili klasična goriva, uljni škriljavci, biomase,
- nuklearne – nuklearna goriva na bazi procesa fisije i fuzije,
- potencijalne – vodne snage, plima i oseka, valovi * ,
- kinetičke – vjetar, valovi * ,
- toplinske – toplina mora, geotermička,
- zračenja – Sunčevo isijavanje.

Primarnim oblicima energije, uz izuzetak vrućih izvora, ne može se neposredno koristiti bez pretvorbe pa je za njihovu primjenu potrebna transformacija u pogodniji oblik.

Pretvorba izvora mora se obaviti zbog nemogućnosti primjene u primarnom obliku, kao i nemogućnosti transporta (obnovljivi izvori sunce, vjetar, valovi ne mogu se transportirati). Isto tako, zbog ekonomičnosti mehanička energija pretvara se u električnu te dalekovodima prenosi do stacionarnih potrošača. Mogućnosti pretvorbe pojedinih nosioca energije su sljedeće:

- Kemijska energija (E_K) sadržana u fosilnim gorivima procesom izgaranja u odgovarajućim ložištima pretvara se u toplinsku, odnosno unutrašnju energiju.
- Nuklearna energija (E_N) procesom fisije ili fuzije u reaktorima također se pretvara u toplinsku, odnosno unutrašnju energiju.
- Potencijalna energija (E_P) vodnih snaga posredstvom vodnih turbina prelazi u mehaničku energiju.
- Kinetička energija (E_K) vjetra i valova putem zračnih odnosno vodnih turbina kao i vjetrenjača te plutača i pontona prelazi u mehaničku energiju. Treba spomenuti da valovi osim kinetičke sadržavaju i potencijalnu energiju.
- Toplinska energija (E_T) mora i geotermičkih izvora posredstvom parnih turbina i izmjenjivača topline transformira se u toplinsku energiju.
- Energija zračenja (E_Z) putem kolektora prelazi u toplinsku energiju, a neposrednom primjenom fotočelija dobiva se električna energija.

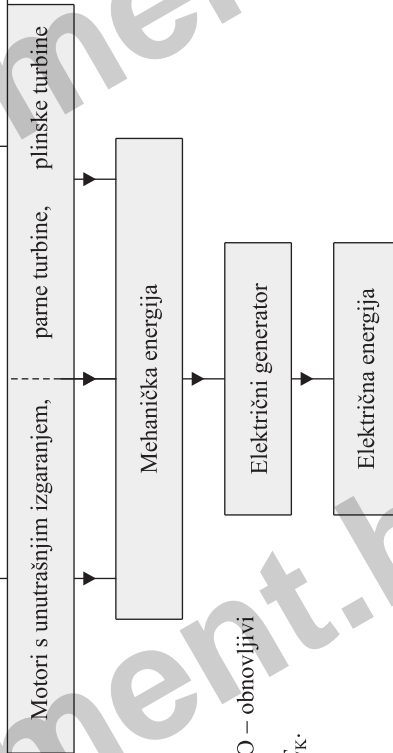
Često je zbog tehničkih i ekonomskih razloga ovako dobivene oblike energije potrebno podvrgnuti daljnjim energetskim pretvorbama. Tako se na primjer toplinska energija u motorima s unutrašnjim izgaranjem i parnim te plinskim turbinama pretvara u mehaničku energiju. Slijedi daljnja pretvorba mehaničke energije putem električnih generatora u korisni oblik, a to je električna energija (tablica 1).

Korisni oblici energije su oni koje zahtijevaju potrošači, a dolaze u obliku toplinske, mehaničke, raskvjetne i kemijske energije (tablica 3).

Način energetskih pretvorbi ovisi o vrsti primarnog izvora, zahtjevima potrošača, optimalnim tehničkim mogućnostima kao i ekonomičnosti postupka te ekološkim zahtjevima.

* Valovi, naime, sadržavaju dva oblika energije i to kinetičku (horizontalno gibanje valova, orbitalno) i potencijalnu (razlika tlaka između valnog brijega i dola).

ENERGIJA IZVORI (primarni oblici)	Kemijska (E_k)	Nuklearna (E_N)	Potencijalna (E_p)		E_p, E_k^* Valovi	Kinetička (E_k)	Toplinska (E_T)		Zračenja (E_Z)
			Vodne snage	Plima i oseka			Toplina mora	Geometrički	
	Fosilna goriva ugljen, nafta, plin (N)	Nuklearna goriva uran, torij (N) (O)			Sunce (O)	Vjetar		prirodni raspad radioaktivnih elemenata (O)	Sunce isijavanje, radijacija (O)
PRETVORBE I UREĐAJI	Izgaranje Ložišta	Fisija			Turbinske			Prijelaz topline	Fotovoltaički efekt
		Reaktori							
ENERGIJA DOBIVENA PRETVORBOM									



Izvori: N – neobnovljivi, O – obnovljivi

*Valovi sadržavaju i E_p i E_k .

Tablica 1. Pregled izvora energije, mogućnosti pretvorbe i njezini korisni oblici

2.

Podjela primarnih oblika energije

Primarni oblici energije, osim podjele prema sadržaju energije (tablica 1), uobičajeno se dijele s obzirom na dominantnost u primjeni na **konvencionalne** i **nekonvencionalne**, a prema iscrpljivosti na **obnovljive** i **neobnovljive** (tablica 2).

Konvencionalni izvori obuhvaćaju primarne oblike s prevladavajućom primjenom u širokom vremenskom razdoblju (fosilna, nuklearna goriva na bazi fisije te vodne snage).

U nekonvencionalne izvore energije ubrajaju se oni za koje se način iskorištavanja još tehnički rješava ili je ekonomski upitan (fuzija, valovi, plima, oseka, toplina mora, uljni škriljavci itd.).

IZVORI			
NEOBNOVLJIVI		OBNOVLJIVI	
Konvencionalni	Nekonvencionalni	Konvencionalni	Nekonvencionalni
fosilna goriva (E_k)	uljni škriljavci (E_k)	vodne snage (E_p)	fuzija lakih atoma D, T (E_N)
fisija teških atoma U, Th (E_N)	bituminozni pijesak (E_k)		plima i oseka (E_p)
			vjetar, valovi (E_k, E_p)
			toplina mora (E_T)
			geotermički izvori (E_T)
			Sunčevo zračenje (E_Z)
			biomasa (E_k)

Tablica 2. Podjela izvora prema sadržaju energije, obnovljivosti i konvencionalnosti

Obnovljivi izvori uključuju fuziju lakih atoma, vodne snage, plimu i oseku, vjetar, valove, toplinu mora, geotermičke izvore, Sunčevo zračenje i biomasu. Izvori koji se obnavljaju ne mogu se istrošiti tijekom vremena jer ih Sunčevo zračenje stalno obnavlja. Većinu ovakvih izvora energije nije ekonomski prikladno akumulirati pa se njima koristi u času kad se pojavljuju. Također, ove izvore nije moguće transportirati.

Neobnovljivi izvori, tj. oni koji se prirodno ne obnavljaju, konačni su bez obzira na razinu potrošnje o kojoj ovisi njihovo trajanje. Takvi se izvori, a to su fosilna i nuklearna goriva, uljni škriljavci te bituminozni pijesak iscrpljuju. Količina energije sadržana u takvim izvorima ograničena je pa će i rezerve ovisno o intenzitetu iskorištavanja biti iscrpljene. Ovi izvori mogu se transportirati i uskladištiti.

Osnovna je razlika između obnovljivih i neobnovljivih izvora u stalnosti te u mogućnosti uskladištenja i transporta kao i u investicijama za izgradnju, pogon i održavanje. Međusobna usporedba ovih izvora pokazuje da su obnovljivi izvori neiscrpniji te se njihov tehnički potencijal obnavlja. Nadalje, ekološki su povoljniji (nema dimnih plinova, radijacije) i imaju niže pogonske troškove. Također, obnovljivi izvori su nepredvidivi, što znači da su im svojstvene dnevne i sezonske varijacije. To se ne odnosi na geotermičku energiju i biomasu koje variraju samo sezonski. Isto tako obnovljivi izvori imaju manju energetska gustoću, što znači da su za pretvorbu potrebni veći prostor i veće investicije (npr. polje kolektora, farma vjetrenjača). Neobnovljivi izvori mogu se skladištiti u obliku u kojem se nalaze u prirodi te zahvaljujući tome iskorištavati prema potrebama.

Zaključno, upotreba primarnih oblika energije ovisi o tehničkom rješenju kao i ekonomičnosti iskorištavanja.

3.

Nosioci kemijske energije

U praksi se najšire primjenjuju fosilna ili klasična goriva koja su nosioci kemijske energije. Mogućnosti njihove pretvorbe u konačne odnosno korisne oblike, kao i njihova primjena pokazane su u tablici 3. Iz tablice proizlazi da se fosilna goriva mogu:

- neposredno primijeniti (metalurški koks),
- neposredno transformirati u električnu energiju (gorive ćelije),
- transformirati u unutrašnju, odnosno toplinsku energiju (izgaranje).

U industriji se najčešće susreće proces izgaranja u kojem se kemijska energija sadržana u fosilnim gorivima pretvara u toplinsku ili unutrašnju energiju. Slijedi pretvorba u mehaničku energiju primjenom parnih i plinskih turbina te motora s unutrašnjim izgaranjem. Iz mehaničke energije posredstvom električnog generatora dobiva se konačni oblik, tj. električna energija.

Potrošačima je potrebna konačna energija u sljedećim korisnim oblicima: toplinska, mehanička, rasvjetna i kemijska energija.

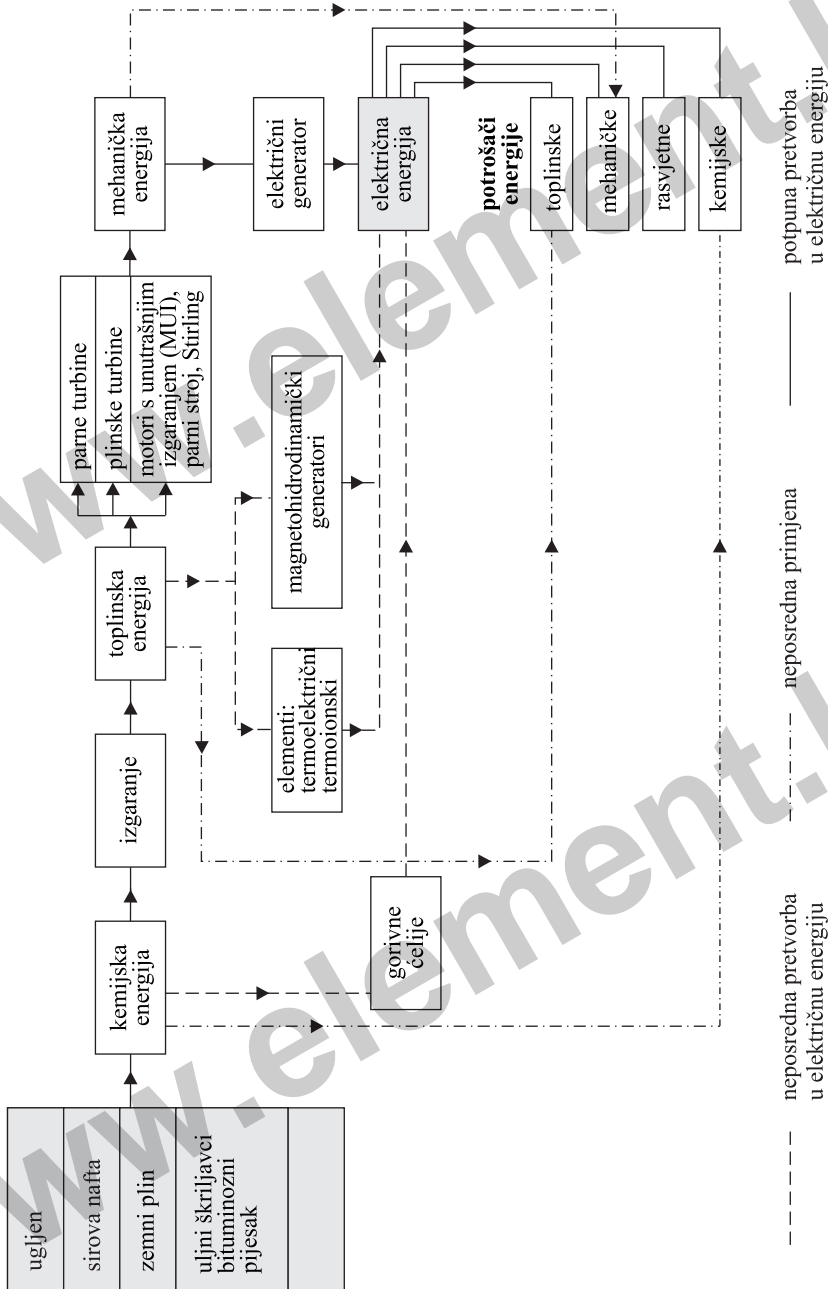
Toplinska energija najčešće se proizvodi izgaranjem goriva u ložištima, iako se može dobiti i iz električne energije u otporničkim i indukcijskim pećima. Ona se može potrošačima dovesti vrelom vodom ili parom uz primjenu izmjenjivača topline.

Mehanička energija dobiva se iz toplinske ili iz električne energije. Potrošači mogu biti stabilni, tj. stacionarni (npr. kompresijski rashladni uređaji) i pokretni (npr. automobili). Stabilni potrošači opskrbljuju se direktno s mehaničkom energijom pomoću pogonskih strojeva (parne, plinske i vodne turbine, motori s unutrašnjim izgaranjem) bez pretvorbe u električnu energiju. To nije pogodno zbog kompliciranog održavanja pogona (doprema goriva, vođenje pogona). Zbog toga je racionalnije proizvesti električnu energiju u velikim agregatima, tj. elektranama i električnom mrežom, dalekovodima je dovesti do uređaja u kojem se pretvara ponovno u mehaničku. Slijedi:

- Stacionarni, nepokretni (stabilni) potrošači koriste se samo električnom energijom (električni motori). Mehanička energija pretvara se u električnu i da-

lekovodom dovodi potrošačima, gdje se opet transformira u mehaničku (npr. rashladni uređaji).

- Transport, tj. pokretni potrošači (propulzija broda, automobila, zrakoplova, tj. u cestovnom i zračnom prometu) koriste se mehaničkom energijom pro-



Tablica 3. Fosilna goriva, njihove pretvorbe i potrošnja

izvedenom pomoću motora s unutrašnjim izgaranjem (MUI). Za željeznički i brodski promet primjenjuju se uz motore s unutrašnjim izgaranjem i parni kotlovi s turbinama.

Rasvjetna energija uključuje klasičnu rasvjetu, kao i energiju za telekomunikacijske uređaje uz isključivu primjenu električne energije.

Kemijska energija je korisni oblik u redukcijskim pećima i elektrolizama gdje se kao popratni oblik javlja i toplinska energija.

Općenito, potrošnja se mora promatrati kao optimalno iskorištenje kod sljedećih energetske potrošača:

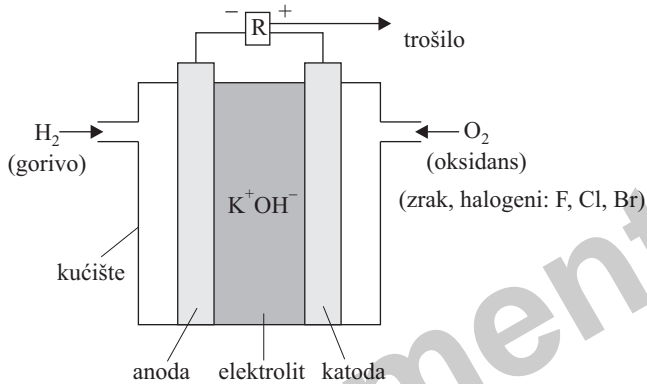
- pogonskih, za pokretanje motora i mehanizama,
- toplinskih, gdje se upotrebljava energija u temperaturnom rasponu od kriogenne $< -150\text{ }^{\circ}\text{C}$ do visokotemperaturne $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ razine,
- kemijskih, uz primjenu toplinske i električne energije (sušenje, destilacija),
- elektrofizikalnih, gdje se upotrebljava energija elektromagnetskog polja (rasvjeta).

3.1. Neposredna primjena

Pri neposrednoj primjeni (tablica 3) kemijska energija je korisni oblik u redukcijskim pećima kao i elektrolizama. Tu se pojavljuje također i toplinska energija kao korisni oblik. U redukcijskim pećima (npr. visoke peći za proizvodnju sirovog željeza) metalurški koks, koji se dobiva iz određenih vrsta kamenog ugljena, upotrebljava se primarno za redukciju željezova oksida, a sekundarno kao gorivo. Uobičajeno je međutim u visokim pećima koks djelomično zamijeniti prirodnim plinom ili teškim loživim uljem.

3.2. Neposredna transformacija u električnu energiju

Kemijska energija može neposredno prelaziti u električnu energiju (tablica 3). Takav proces odvija se u gorivnoj ćeliji ili elementu koji se sastoji od dviju elektroda uronjenih u isti elektrolit (slika 1). U gorivnoj ćeliji vodik se kao gorivo dovodi na anodu, a kisik kao oksidans na katodu. Tu dolazi do kontinuirane pretvorbe kemijske energije goriva i oksidacijskog sredstva u električnu energiju. Proces se odvija kod konstantne temperature, tj. izotermno.



Slika 1. Proces u gorivnoj ćeliji (H_2-O_2) uz lužnati elektrolit

U ovom povratljivom procesu gorivo je kemijski element ili spoj visoke unutrašnje energije. Na anodi dolazi do oksidacije goriva pri čemu se oslobađaju elektroni koji se vode od anode kroz vanjski strujni krug preko trošila do katode. Tu se elektronima reducira drugi kemijski element ili spoj koji se dovodi kao oksidans. Energija se dobiva prema izrazu:

$$e_{\text{povr.}} = H(T) + T \left[\sum_N a_N'' s_N''(p, T) - \sum_N a_N' s_N'(p, T) \right] \quad (3.1)$$

$H(T)$ = toplinska vrijednost goriva (kJ/kmol),

a_N' i a_N'' = količine reaktanata i produkata reakcije (kmol/kmol_{gor.}),

s_N' i s_N'' = apsolutne entropije reaktanata i produkata reakcije (kJ/kmol K),
indeks N odnosi se na reaktante i produkte.

Stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu definira se kao omjer slobodne entalpije i toplinske vrijednosti istog goriva:

$$\eta = \frac{h_{\text{povratljivo}}}{H_{\text{goriva}}} \quad (3.2)$$

Na toplinsku vrijednost goriva i slobodnu entalpiju utječe agregatno stanje vode na kraju procesa kao što je slučaj kod određivanja više ili niže toplinske vrijednosti.

Ukupni stupanj djelovanja gorivne ćelije (η_{GC}):

$$\eta_{GC} = \frac{(\eta \cdot V_G)}{E} \quad (3.3)$$

V_G = napon na stezaljkama gorivne ćelije (V),

E = elektrokemijski potencijal (V).

Prednosti gorivnih elemenata očituju se u visokom stupnju iskorištenja, bešumnom radu, malom utjecaju na okoliš.

Zbog malih snaga od stotinjak kilovata očekuje se primjena u specijalne svrhe, kao što su postrojenja bez nadzora (relejne stanice radija i TV-a) prijenosne radiostanice te kod svemirskih brodova.

S obzirom na agregatno stanje mogu se primijeniti kruta, tekuća i plinovita goriva (tablica 4). Od krutih goriva upotrebljava se ugljik (C) i sumpor (S) uz stupanj djelovanja veći od 1 jer se dio topline za vrijeme procesa dobiva iz okoliša. Neka od tekućih goriva su n-pentan (C_5H_{12}), benzol (C_6H_6), n-oktan (C_7H_{18}), pri čemu je stupanj djelovanja to viši što je veći postotak ugljika. U plinovita goriva ubrajaju se između ostalih vodik (H_2), metan (CH_4), butan (C_4H_{10}).

Gorivo	Simbol	Gornja toplinska vrijednost MJ/kmol	η transformacije	Goriva koja se još mogu upotrebljavati
kruto ugljik	C	393,5	1,00023 *	sumpor
tekuće benzol toluol	C_6 C_7H_8	3268 3906	0,97998 0,9780	n-pentan heksan, heptan, oktan
plinovito vodik metan butan	H_2 CH_4 C_4H_{10}	285,9 890,5 2879	0,830 0,9187 0,9555	CO, acetilen, etilen, etan propan

Tablica 4. Svojstva odabranih goriva

Gorivne ćelije razlikuju se prema gorivu, oksidacijskom sredstvu i materijalu elektroda, a grupiraju se prema radnim temperaturama na:

- niskotemperaturne (do $100\text{ }^\circ\text{C}$): H_2-O_2 ; metalne elektrode; elektrode od ugljika,
- srednjotemperaturne (od $150\text{ }^\circ\text{C}$ do $250\text{ }^\circ\text{C}$): H_2-O_2 , visoki tlak; H_2-O_2 , elektrode od poroznog nikla (Ni), elektrolit KOH visoke koncentracije,
- visokotemperaturne ($500\text{ }^\circ\text{C}$): ugljikovodici–kisik; ugljikovodici–zrak uz čvrsti elektrolit (smjesa cirkonijeva oksida ZrO_2 i kalcijeva oksida CaO).

* η veći od 1 znači da se dio topline za vrijeme procesa uzima iz okoliša.

3.3. Pretvorba kemijske energije u toplinsku. Goriva i izgaranje

Kemijska energija sadržana u fosilnim ili klasičnim gorivima najčešće se transformira u unutrašnju, odnosno toplinsku energiju procesom izgaranja. No, svaka tvar koja pri izgaranju, odnosno kemijskoj reakciji sa O_2 oslobađa toplinu (egzotermička reakcija) ne mora biti gorivo. Npr., kremen je u metalurškim procesima izvor topline (izgaranjem se oslobađa toplina), ali nije gorivo.

Fosilna goriva mogu se podijeliti s obzirom na agregatno stanje i nastanak (tablica 5):

agregatno stanje

- kruta,
- tekuća,
- plinovita;

nastanak

- prirodna,
- industrijska.

Gorivo	Agregatno stanje		
	Kruto	Tekuće	Plinovito
Prirodna goriva	drvo, treset, mrki ugljen, kameni ugljen, antracit, škrljajavci, otpad	nafta	prirodni plin
Industrijska goriva	drveni ugljen, koks, polukoks, sušeni ugljen, ugljeni prah, ugljeni briketi, biološke mase	benzin, kerozin (derivat 150–300 °C), dizelsko gorivo, mazut, razna ulja, alkoholi	naftni plin, koksni plin, generatorski plin, miješani plin, dimni plinovi, bioplin, propan-butan (smjesa)

Tablica 5. Podjela fosilnih goriva

3.3.1. Svojstva krutih, tekućih i plinovitih goriva

Kruta i tekuća goriva su kompleks organskih i mineralnih tvari, a sastoje se od dva dijela i to:

- gorivog (C, H, S_V) i
- nesagorivog (N, O, W, A),

pri čemu su upotrijebljene oznake: C – ugljik, H – vodik, S_V – volatilni ili hlapivi sumpor, N – dušik, O – kisik, W – vlaga, A – pepeo.

Kemijski sastav gorivog dijela, tj. oblik i formula kemijskog spoja određuju se vrlo složeno, dok se oblik i sastav nesagorivog dijela određuju jednostavno.

Kruta i tekuća goriva definiraju se elementarnim sastavom koji je zbroj svih kemijskih komponenata goriva. Elementarni sastav ne daje uvid u molekularnu i kemijsku strukturu goriva. Za kruta i tekuća goriva elementarni sastav je:

$$C + H + S_V + O + N + A + W = 100\%. \quad (3.4)$$

Gorivi dio čine C, H, S_V , pri čemu je S_V volatilni (hlapivi) sumpor koji ulazi u sastav organskih spojeva ($S_{org.}$) i pirita S_p (FeS_2), pa je:

$$S_V = S_{org.} + S_p.$$

Organski sumpor je vezan sa C, H, N i O. Osim volatilnog, u gorivu se nalazi i sumpor vezan s mineralnim solima ($CaSO_4$, $MgSO_4$, $FeSO_4$). Ovakav sumpor naziva se sulfatni (S_S), nesagoriv je i ulazi u balast, tj. pepeo.

Slijedi ukupni sumpor:

$$S_{uk} = S_V + S_S = S_{org.} + S_p + S_S. \quad (3.5)$$

Nesagorivi dio čine N, O, W te mineralne nesagorive tvari koje nakon izgaranja daju pepeo. Pritom se balast, odnosno nesagorivi dio dijeli na:

- unutarnji (O, N, S_S) i
- vanjski (pepeo A, vlaga W).

Vanjski balast ovisi o vanjskim uvjetima, kao npr. dobivanje, skladištenje itd.

Kruta i tekuća goriva uspoređuju se prema sastavu, tj. masama:

- radna masa (r)
- suha masa (s) bez vlage (W)
- goriva masa (g) bez vlage i pepela (W, A)
- organska masa (o) bez W, A, S_p , sadržava samo $S_{org.}$

Radna masa obuhvaća gorivo u obliku u kojem dolazi potrošaču, izgara te se najčešće upotrebljava u energetskim proračunima. Elementarni sastav radne mase je:

$$C^r + H^r + S_V^r + O^r + N^r + A^r + W^r = 100\% \quad (3.6)$$

(C, H, O itd. su maseni % elemenata).

Suha masa ne sadržava vlagu:

$$C^s + H^s + S_V^s + O^s + N^s + A^s = 100\%. \quad (3.7)$$

Goriva masa ne sadržava vanjski balast, tj. vlagu (W) i pepeo (A):

$$C^g + H^g + S_V^g + O^g + N^g = 100\%. \quad (3.8)$$

Goriva masa je uvjetni naziv jer su gorivi elementi samo C, H, i S_V . Sastav gorive smjese ovisi o načinu dobivanja goriva i geološkoj dobi. Sadržaj C raste, a H opada sa starenjem. Npr., sadržaj C: treset 50 – 60% ; mrki ugljen 60 – 75% ; kameni ugljen 75 – 90% .

Organska masa je ona koja sadržava samo organski sumpor ($S_{org.}$), a ne piritni (S_p):

$$C^o + H^o + S_{org}^o + O^o + N^o = 100\% \quad (3.9)$$

Za određivanje sastava pojedinih masa upotrebljavaju se međusobni odnosi prikazani u tablici 6:

Masa goriva	organska (o)	goriva (g)	suha (s)	radna (r)
organska	1	$\frac{100-S^g}{100}$	$\frac{100-(S^s+A^s)}{100}$	$\frac{100-(S^r+A^r+W^r)}{100}$
goriva	$\frac{100}{100-S_g}$	1	$\frac{100-A^s}{100}$	$\frac{100-(A^r+W^r)}{100}$
suha	$\frac{100}{100-(S^s+A^s)}$	$\frac{100}{100-A^s}$	1	$\frac{100-W^r}{100}$
radna	$\frac{100}{100-(S^r+A^r+W^r)}$	$\frac{100}{100-(A^r+W^r)}$	$\frac{100}{100-W^r}$	1

Tablica 6. Međusobni odnosi masa goriva

Najvažniji je odnos gorive i radne mase, a dobiva se kako slijedi:

$$\frac{C^g + H^g + S_V^g + O^g + N^g = 100\%}{C^r + H^r + S_V^r + O^r + N^r + A^r = 100 - (A^r + W^r)} \quad / \quad :$$

$$\frac{C^g}{C^r} = \frac{100}{100 - (A^r + W^r)}$$

pa je za ugljik

$$C^g = C^r \frac{100}{100 - (A^r + W^r)}$$

Na isti način izražavaju se i odnosi ostalih sastojaka u gorivu (H, S_V itd).

PRIMJER 3.1.

Sastav gorive mase ugljena (maseni %) je: 81% C^g , 5,4% H^g , 8,8% O^g , 1,6% N^g , 3,2% S_V^g . Suha masa pepela je $A^s = 11,1\%$, a sadržaj vlage u radnoj masi goriva je $W^r = 5,9\%$. Izračunati sastav radne mase goriva.

• **Rješenje.**

Iz tablice 6 (zadnja kolona, 3. red): $A^r = \frac{A^s(100 - W^r)}{100}$, slijedi:

$$A^r = \frac{11,1 \cdot (100 - 5,9)}{100} = 10,5\%.$$

Iz zadnje kolone 2. red proizlazi:

$$C^r = \frac{C^s \cdot (100 - A^r - W^r)}{100} = \frac{81 \cdot (100 - 10,5 - 5,9)}{100} = 81 \cdot 0,836 = 67,72\%$$

$$H^r = \frac{H^s \cdot (100 - A^r - W^r)}{100} = 5,4 \cdot 0,836 = 4,51\%$$

$$O^r = \frac{O^s \cdot (100 - A^r - W^r)}{100} = 8,8 \cdot 0,836 = 7,36\%$$

$$N^r = \frac{N^s \cdot (100 - A^r - W^r)}{100} = 1,6 \cdot 0,836 = 1,34\%$$

$$S_V^r = \frac{S_V^s \cdot (100 - A^r - W^r)}{100} = 3,2 \cdot 0,836 = 2,67\%$$

Plinovita goriva su smjesa gorivih i nesagorivih plinova:

- Gorivi dio sadržava zasićene (C_xH_{2x+2}) i nezasićene (C_xH_{2x}) ugljikovodike, vodik, ugljikove okside i sumporovodik.
- Nesagorivi dio uključuje dušik (N_2), ugljikov dioksid (CO_2) i kisik (O_2).

Prirodni plinovi sadržavaju metan (CH_4) do 98%, te manji dio etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}), etilena (C_2H_4) i propilena (C_3H_6).

Sadržaj gorivih dijelova u industrijskim plinovima na bazi vodika i ugljikova oksida je 25–45%. Kao balast dolazi N_2 i CO_2 .

Sastav (u volumnim %) je:

$$\sum_{i=1}^m C_xH_{2x+2} + \sum_{i=1}^m C_xH_{2x} + H_2 + CO + H_2S + O_2 + N_2 + CO_2 = 100\%. \quad (3.10)$$

Sadržaj komponenta **vlažnih plinova** (vol. %) iznosi:

$$K^V = K^S \cdot \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O} + d} = K^S \cdot \frac{0,805}{0,805 + d} \quad (3.11)$$

K^V = volumni sadržaj komponenta u vlažnom plinu,

K^S = volumni sadržaj komponenta u suhom plinu,

d = sadržaj vodene pare (kg/m^3),

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{M}{V_m} = \frac{18}{22,4} = 0,805 \text{ kg/m}^3 \text{ gustoća vodene pare kod normalnih okolnosti}$$

($p = 1,01325 \text{ bar}$, $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$), gdje je
 $M = \text{molarna masa} = 18 \text{ kg/kmol}$,
 $V_m = \text{molarni volumen} = 22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$.

Kod plinovitih goriva računa se sa **suhim sastavom**. Elementarna svojstva plinovitih goriva i plinova izgaranja određuju se često pomoću ugljikova broja (x). Smjesa ugljikovodika metanova reda $\text{C}_x\text{H}_{2x+2}$ zamjenjuje se uvjetnim ugljikovodikom, a broj x pokazuje količinu atoma u njemu (npr. za CH_4 $x = 1$). Uz poznavanje sadržaja ugljikovodika metanova reda u vol. % dobiva se:

$$x = \frac{\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + \dots + x\text{C}_x\text{H}_{2x+2}}{100 - (\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2)} \quad (3.12)$$

3.3.2. Toplinska vrijednost goriva

Toplinska vrijednost ili ogrjevna moć goriva je količina topline koja se oslobađa pri potpunom sagorijevanju jedinice mase (kg) ili volumena goriva (m^3). Pri potpunom sagorijevanju komponente goriva se potpuno oksidiraju. Toplinska vrijednost krutog i tekućeg goriva odnosi se na masu od 1 kg, a plinovitog na volumen od 1 m^3 kod normalnih uvjeta. Ova veličina određuje se za kruta i teška tekuća goriva (mazut) laboratorijski pomoću kalorimetrijske bombe. Za plinovita i laka tekuća goriva (benzin, kerozin) određuje se u kalorimetru (H. Junkers). Uz poznati elementarni sastav krutog i tekućeg goriva, toplina izgaranja dobiva se analitičkim putem pomoću empirijskih formula od kojih je najčešća ona po D. J. Mendeljevu.

Kruta i tekuća goriva

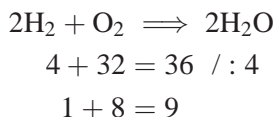
U gorivu se potpuno oksidiraju ugljik (C), vodik (H) i volatilan, hlapivi sumpor (S_V). Produkti izgaranja sadržavaju vodu (H_2O) koja potječe iz vlage (W) i izgorjelog vodika (H) iz sastava goriva. Nalazi li se sva voda u plinovima izgaranja u tekućem stanju, toplina koja se oslobađa izgaranjem je **gornja ili viša toplinska vrijednost (H_V)**. Nalazi li se sva voda u plinovima izgaranja u plinovitom, tj. parnom stanju, toplina koja se oslobađa izgaranjem je **donja ili niža (H_n) toplinska vrijednost**.

Za pretvaranje tekuće faze u paru troši se energija pa je $H_n < H_V$ za toplinu isparavanja vode. U nižu toplinsku vrijednost (H_n) ne ulazi toplina kondenzacije vode pa se H_n i H_V razlikuju za toplinu isparavanja koja iznosi $r = 2500 \text{ kJ/kg}$ kod $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Slijedi:

$$H_n = H_V - q_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.13)$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = r \cdot G_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.14)$$

Vodik iz goriva oksidacijom daje 9 kg H₂O:



ili $\frac{9H^r}{100}$ kg H₂O pare/kg goriva.

Vlaga iz goriva je: $W^r/100$ kg · H₂O pare/kg goriva, pa se isparavanjem vlage dobiva:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{9H^r + W^r}{100} \text{ kg H}_2\text{O pare/kg goriva.} \quad (3.15)$$

Uz $r = 2500$ kJ/kg dobiva se:

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = r \cdot G_{\text{H}_2\text{O}} = r \cdot \frac{9H^r + W^r}{100} = 2500 \cdot \frac{9H^r + W^r}{100} = 25(9H^r + W^r). \quad (3.16)$$

Slijedi niža toplinska vrijednost radne mase:

$$H_n^r = H_v^r - 25 \cdot (9H^r + W^r) \quad (3.17)$$

$$H_n^r = H_v^r - 225H^r - 25W^r \text{ kJ/kg} \quad (3.18)$$

što vrijedi i za suhu, gorivu i organsku masu:

$$H_n^s = H_v^s - 225 H^s$$

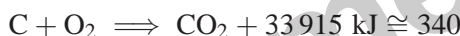
$$H_n^g = H_v^g - 225 H^g$$

$$H_n^o = H_v^o - 225 H^o.$$

Uz poznati elementarni sastav krutih i tekućih goriva viša toplinska vrijednost računa se po Mendeljejevu:

$$H_v^r = 340 C^r + 1260 H^r - 109 (O^r - S_v^r) \text{ kJ/kg.} \quad (3.19)$$

C^r , H^r , O^r , S_v^r su elementi u masenim %, a koeficijenti su više toplinske vrijednosti izgaranja elementa:



Stvarni koeficijenti su 33 915, 126 000, 108 900 ako se elementi ne izražavaju u % (npr. 0,5 C). Zaokružene vrijednosti 340, 1260, 109 upotrebljavaju se ako su elementi izraženi u % (npr. 50 C).

Niža toplinska vrijednost dobiva se uvrštenjem izraza (3.19) u (3.18):

$$H_n^r = 340 C^r + 1035 H^r - 109 (O^r - S_v^r) - 25 W^r \text{ kJ/kg} \quad (3.20)$$

ili

$$H_n^r = 340 C^r + 1035 \left(H^r - \frac{O^r}{8} \right) + 109 S_v^r - 25 W^r. \quad (3.21)$$

Član $\left(H^r - \frac{O^r}{8}\right)$ je slobodni vodik jer je $\frac{O^r}{8}$ vezani vodik, tj. onaj što ga veže kisik koji se nalazi u gorivu.

Uz poznavanje međusobnih odnosa masa goriva mogu se računati toplinske vrijednosti, kao npr.

$$H_n^r = H_n^g \cdot \frac{100 - A^r - W^r}{100} - 25 W^r. \quad (3.22)$$

● ● PRIMJER 3.2.

Goriva masa ima nižu toplinsku vrijednost $H_n^g = 22\,500$ kJ/kg. Radna masa sadržava 12,9% pepela i 37,4% vlage. Izračunati nižu toplinsku vrijednost radne mase (kJ/kg).

● Rješenje.

$$\begin{aligned} H_n^r &= H_n^g \cdot \frac{100 - A^r - W^r}{100} - 25 W^r \\ &= 22\,500 \cdot \frac{100 - 12,9 - 37,4}{100} - (25 \cdot 37,4) = 10\,250. \end{aligned}$$

Plinovita goriva

Za razliku od krutih i tekućih, sastav plinovitih goriva uobičajeno je izražen u volumnim postocima te je uveden standardni kubični metar suhog plina. Toplinska vrijednost određuje se izgaranjem u (H. Junkers) ili pomoću kalorimetrijske bombe. Također se određuje i empirijski temeljeno na sastavu plina uz poznavanje toplinskih vrijednosti svake komponente. Slijede viša i niža toplinska vrijednost suhog plina (kJ/m^3):

$$\begin{aligned} H_V^s &= 398 \text{CH}_4 + 700 \text{C}_2\text{H}_6 + 995 \text{C}_3\text{H}_8 + 1285 \text{C}_4\text{H}_{10} + 1575 \text{C}_5\text{H}_{12} \\ &\quad + 126,5 \text{CO} + 127,5 \text{H}_2 + 257 \text{H}_2\text{S} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} H_n^s &= 358 \text{CH}_4 + 640 \text{C}_2\text{H}_6 + 915 \text{C}_3\text{H}_8 + 1190 \text{C}_4\text{H}_{10} + 1465 \text{C}_5\text{H}_{12} \\ &\quad + 126,5 \text{CO} + 107,5 \text{H}_2 + 234 \text{H}_2\text{S}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Toplinska vrijednost može se izračunati i pomoću prije definiranog ugljikova broja x izrazima koje je predložio G. F. Knorr:

$$H_V^s = 29\,307,6 x + 10\,048,32 \quad (3.25)$$

$$H_n^s = 27\,423,5 x + 8\,373,6. \quad (3.26)$$

Ekvivalentno (uvjetno) gorivo

Za usporedbu različitih goriva primjenjuje se pojam uvjetnog ili ekvivalentnog goriva. Odnos niže toplinske vrijednosti H_n krutog, tekućeg ili plinovitog goriva i topline ekvivalentnog goriva H_{EG} naziva se toplinski ekvivalent ε , koji utvrđuje koji dio topline ekvivalentnog goriva odgovara nižoj toplinskoj vrijednosti promatranog goriva:

$$\varepsilon = \frac{H_n}{H_{EG}}. \quad (3.27)$$

Slijedi:

masa ekvivalentnog goriva,

$$D_{EG} = D \cdot \varepsilon, \quad (3.28)$$

volumen ekvivalentnog plina,

$$V_{EG} = V \cdot \varepsilon. \quad (3.29)$$

Toplinske vrijednosti ekvivalentnih goriva su sljedeće:

- ugljen H_{EU} : $tEU = 29,3 \cdot 10^6$ kJ (kameni ugljen) ili
engl. *tonne of coal equivalent*, TCE,
- nafta H_{EN} : $tEN = 41,8 \cdot 10^6$ kJ (nafta) ili
engl. *tonne of oil equivalent*, TOE,
- prirodni plin H_{EP} : $m^3EP = 34 \cdot 10^6$ kJ (prirodni plin) ili
engl. *natural gas equivalent*, NGE.

3.3.3. Stehiometrijske jednadžbe izgaranja

Izgaranje goriva je složeni fizikalno-kemijski proces čiji se mehanizam temelji na Lavoisierovu i Daltonovu zakonu te kemijskim ravnotežama. Kemizam izgaranja je proces oksidacije gorivih sastojaka kisikom, uglavnom iz zraka. Proces se odvija pri određenoj temperaturi s oslobađanjem topline. Fizikalno svojstvo izgaranja okarakterizirano je brzinom kemijske reakcije koja je proporcionalna koncentraciji reaktanata, a raste eksponencijalno s povišenjem temperature.

Jedan od uvjeta za odvijanje procesa izgaranja je **temperatura zapaljenja**. To je ona granična temperatura iznad koje je oslobađanje topline brže, a ispod koje je ono sporije od odvođa topline. Ova temperatura ovisi o brzini kemijske reakcije kod oksidacije i o odvođenju topline koja se oslobađa kemijskom reakcijom. Bržim oslobađanjem topline od njezina odvođenja temperatura će rasti, što dovodi do zapaljenja goriva.

Za proces izgaranja karakteristična je **temperatura izgaranja**, i to teoretska i stvarna. Odvija li se izgaranje u toplinski izoliranom, tj. adijabatskom sustavu,

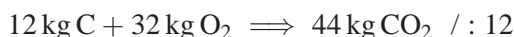
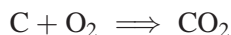
plinovi izgaranja postižu vrlo visoku temperaturu koja se naziva teoretska temperatura. Stvarna temperatura niža je od teoretske jer se dio topline oslobođene izgaranjem predaje okolnom mediju zbog postojanja temperaturnih razlika. Pojave pri izgaranju u ložištu povezane su s promjenama temperatura na temelju prvog i drugog zakona termodinamike. Procesi izgaranja su nepovratljivi.

Procesi izgaranja odvijaju se u skladu sa stehiometrijskim zakonima. Iz stehiometrijskih jednadžbi računa se količina kisika i zraka za izgaranje goriva te količina nastalih dimnih plinova. Pri proračunu izgaranja za kruta i tekuća goriva upotrebljava se elementarna analiza, a za plinovita molekularna analiza, pa se stehiometrijski odnosi mogu izraziti u masenim ili volumnim postocima.

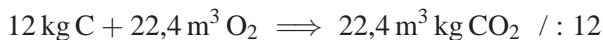
Kruta i tekuća goriva

Jednadžbe oksidacije gorivih elemenata:

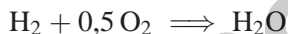
1. ugljik – potpuno sagorijevanje



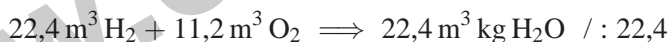
Ako se O_2 i CO_2 žele izraziti u m^3 ($1 \text{ kmol} = 22,4 \text{ m}^3$ kod n.o.), slijedi:



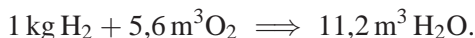
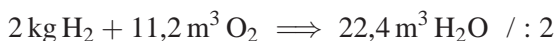
2. vodik



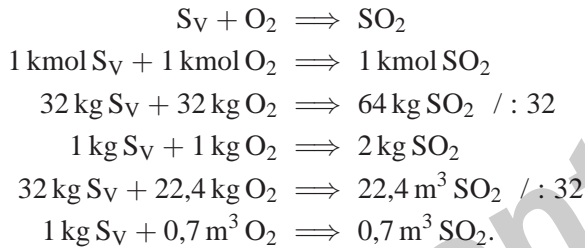
Ako se O_2 i H_2O žele izraziti u m^3 ($1 \text{ kmol} = 22,4 \text{ m}^3$ kod n.o.), slijedi:



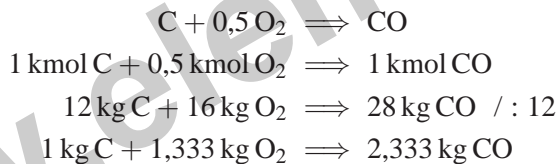
ili za vodik u kg, a kisik i vodu u m^3 iz:



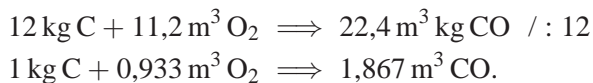
3. volatilni sumpor



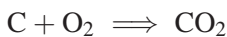
4. ugljik – nepotpuno izgaranje



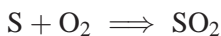
ili O_2 i CO izraženi u m^3



Koeficijenti oksidansa i produkta izgaranju gorivih sastojaka (m^3) su:



$$1 \text{ kg } C + \underbrace{\frac{2,667 \cdot 22,4}{32}}_{1,867} \text{ m}^3 O_2 \Rightarrow \underbrace{\frac{3,667 \cdot 22,4}{44}}_{1,867} \text{ m}^3 CO_2$$



$$1 \text{ kg } S + \underbrace{\frac{1 \cdot 22,4}{32}}_{0,7} \text{ m}^3 O_2 \Rightarrow \underbrace{\frac{2 \cdot 22,4}{64}}_{0,7} \text{ m}^3 SO_2$$



$$1 \text{ kg } H_2 + \underbrace{\frac{8 \cdot 22,4}{32}}_{5,6} \text{ m}^3 O_2 \Rightarrow \underbrace{\frac{9 \cdot 22,4}{18}}_{11,2} \text{ m}^3 H_2O$$



$$1 \text{ kg } C + \underbrace{\frac{1,333 \cdot 22,4}{32}}_{0,933} \text{ m}^3 O_2 \Rightarrow \underbrace{\frac{2,333 \cdot 22,4}{28}}_{1,867} \text{ m}^3 CO$$

Element	Maseni udio	Količina elementa	Količina kisika		
			kg/kg _{gor.}	kg/kg _{gor.}	m ³ /kg _{gor.}
C ⇒ CO ₂	C	C/12	O = C/12	2,667 C	1,867 C
C ⇒ CO	C	C/12	O = C/24	1,333 C	0,933 C
H ₂ ⇒ H ₂ O	H	H/2	O = H/4	8 H	5,6 H
S ⇒ SO ₂	S	S/32	O = S/32	1 S	0,7 S
O ₂	O	O/32	O = -O/32	-O	-0,7 O
N ₂	N	N/28	—	—	—
vлага	W	W/18	—	—	—

Tablica 7. Količina kisika po kg goriva

Tablica sadržava kisik unesen s negativnim predznakom ako je prisutan u sastavu goriva. U tom se slučaju za njegov iznos smanjuje količina zraka potrebna za izgaranje.

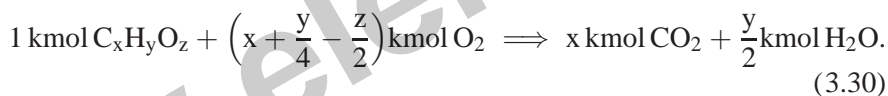
Opće jednadžbe izgaranja

U tekućim i plinovitim gorivima glavni su sastojci ugljikovodici čiji se sastav može pisati općenito:

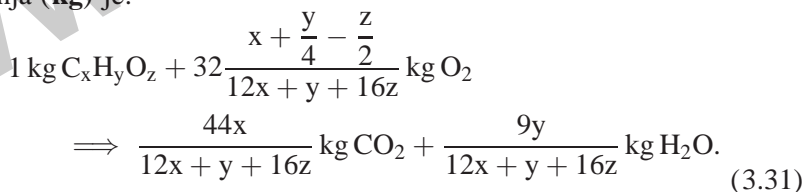
- A. C_xH_yO_z za ugljikovodike s kisikom,
 - B. C_xH_y za ugljikovodike bez kisika,
- x, y, z = broj atoma C, H, O.

A. Jednadžbe izgaranja za ugljikovodike s kisikom

1. Za potpuno izgaranje vrijedi jednadžba (**kmol**):



2. Uz relativnu molekularnu masu ugljikovodika $12x + y + 16z$, jednadžba izgaranja (**kg**) je:



3. Za izračunavanje kisika, ugljikova dioksida i vode (m^3/kg) goriva vrijedi jednačba:

$$1 \text{ kg C}_x\text{H}_y\text{O}_z + 22,4 \frac{x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}}{12x + y + 16z} \text{ m}^3 \text{ O}_2$$

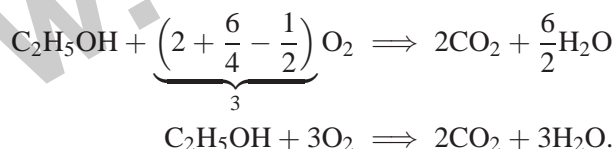
$$\Rightarrow \frac{22,4x}{12x + y + 16z} \text{ m}^3 \text{ CO}_2 + \frac{11,2y}{12x + y + 16z} \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}. \quad (3.32)$$

● ● **PRIMJER 3.3.**

Izgaranje etanola ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

● **Rješenje.**

Iz jednačbe (3.30) slijedi (kmol):



Iz izraza (3.31) slijedi ($\text{kg}/\text{g}_{\text{gor.}}$):

$$1 \text{ kg C}_2\text{H}_5\text{OH} + 32 \frac{2 + \frac{6}{4} - \frac{1}{2}}{\underbrace{12 \cdot 2 + 6 + 16}_{46}} \text{ kg O}_2 \Rightarrow \frac{2 \cdot 44}{46} \text{ kg CO}_2 + \frac{9 \cdot 6}{46} \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2,087 \text{ kg O}_2 \Rightarrow 1,931 \text{ kg CO}_2 + 1,174 \text{ kg H}_2\text{O}.$$

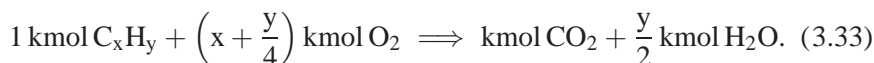
Iz jednačbe (3.32) za izgaranje 1 kg $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ slijede O_2 , CO_2 i H_2O izraženi u m^3 :

$$1 \text{ kg C}_2\text{H}_5\text{OH} + 22,4 \frac{2 + \frac{6}{4} - \frac{1}{2}}{\underbrace{12 \cdot 2 + 6 + 16}_{46}} \text{ m}^3 \text{ O}_2 \Rightarrow \frac{22,4 \cdot 2}{46} \text{ m}^3 \text{ CO}_2 + \frac{11,2 \cdot 6}{46} \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}$$

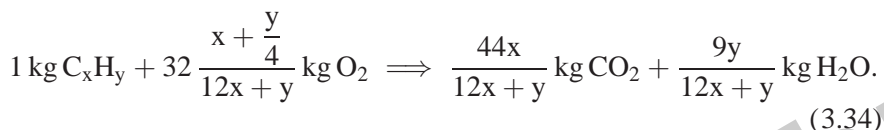
$$1 \text{ kg C}_2\text{H}_5\text{OH} + 1,461 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \Rightarrow 0,974 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 + 1,461 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}.$$

B. Jednačbe izgaranja za ugljikovodike bez kisika C_xH_y

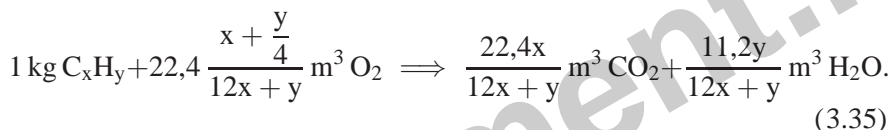
4. Za potpuno izgaranje (kmol) vrijedi:



5. Uz relativnu molekularnu masu $12x + y$ jednadžba izgaranja (**kg/kg**) je:



6. Za izračunavanje kisika, ugljikova dioksida i vode (**m³/kg**) ugljikovodika C_xH_y je:

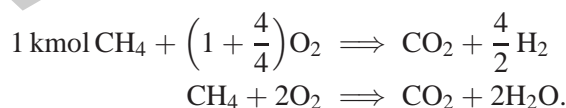


● PRIMJER 3.4.

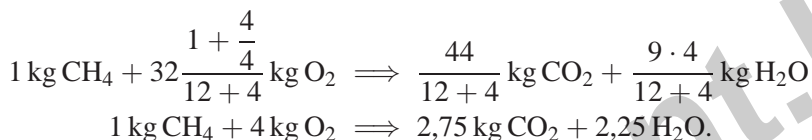
Izgaranje metana (CH_4).

● Rješenje.

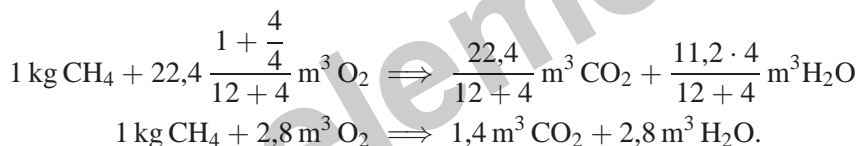
Iz izraza (3.33) (kmol) slijedi:



Iz jednadžbe (3.34) (kg/kg) dobiva se:



Iz izraza (3.35) za izgaranje 1 kg CH_4 slijede O_2 , CO_2 i H_2O (m^3):



3.3.4. Potrošnja kisika i zraka pri stehiometrijskom izgaranju

Za oksidaciju goriva, odnosno izgaranje potreban je kisik koji u praksi potječe iz zraka. Prema stehiometrijskim jednadžbama određuju se potrebne količine kisika i zraka za teoretsko, odnosno stehiometrijsko izgaranje. Ova potpuna oksidacija odvija se uz njihovu minimalnu količinu.