

2. GORIVA

UVOD

Reč energija nastala je od grčke riječi *energōs* što znači aktivnost. Energija je karakteristika sistema kojom se opisuje sposobnost tog sistema da vrši neki rad. Prema međunarodnom sisemu mernih jedinica, u čast engleskom fizičaru James Prescott Joule-u (1818 - 1889), merna jedinica za energiju nazvana je džul (J). Važno svojstvo energije je da ne može niti nastati niti nestati pa je prema tome količina energije u zatvorenom sistemu uvek konstantna. Ovo svojstvo energije zove se zakon o očuvanju energije.

Iako ne može niti nastati ni iz čega niti nestati, energija može prelaziti iz jednog oblika u drugi. Prelazak energije iz jednog oblika u drugi naziva se rad ili snaga. U čast škotskom inženjeru i izumitelju James Watt-u (1736 - 1819) merna jedinica za rad nazvana je vat (W). Jedan vat je rad obavljen u jednoj sekundi prelaskom jednog džula energije iz jednog oblika u drugi ($W = 1 \text{ J/s}$). Iz definicije je vidljivo da se u vatima zapravo izražava brzina prelaska energije iz jednog oblika u drugi. Ponekad se kao jedinica mere za energiju koristi i jedinica vat-sat (Wh). Jedan vat-sat je konstantni rad (snaga) od jednog vata u periodu od jednog sata, pa je prema tome $1\text{Wh} = 1 \text{ J/s} * 3600\text{s} = 3600\text{J}$. Za količinu proizvedene odnosno utrošene električne energije uobičajeno se koriste merne jedinice Wh, a to su kWh, MWh, i GWh (kilovat-sat, megavat-sat i gigavat-sat).

2.1. IZVORI ENERGIJE

2.1.1. Podela

Energija se pojavljuje u akumulisanim ili prelaznim oblicima. Energija prisutna u prirodnim izvorima naziva se primarna energija, a takvi izvori primarnim izvorima energije. Različitim tehnikama primarna energija se može transformisati u sekundarnu energiju. Izvori energije iz kojih se dobija sekundarna energija nazivaju se **sekundarnim** izvorima energije.

Osnovni oblici u kojima se javlja primarna energija su:

- Fosilna goriva
- Nuklearna goriva
- Obnovljivi vidovi energije

Sekundarna energija se najčešće javlja u obliku:

- Električne energije
- Energije tople vode i vazduha i
- Prerađenih čvrstih, tečnih i gasovitih goriva.

S obzirom na nivo korišćenja, **primarni** izvori mogu biti:

- Konvencionalni izvori energije i
- Nekonvencionalni izvori energije.

Imajući u vidu prirodnu obnovljivosti, izvori energije mogu biti:

- Obnovljivi izvori energije i
- Neobnovljivi izvori energije.

Pod pojmom **obnovljivih izvora energije**, podrazumevaju se izvori energije koji se nalaze u prirodi i obnavljaju se u potpunosti ili delimično. U zavisnosti od brzine trošenja mogu biti neiscrpni i iscrpivi. Neiscrpni obnovljivi resursi su: solarno zračenje, hidroenergija, energija plime, talasa i vetra. Ostali obnovljivi resursi su samo uslovno neiscrpni, to jest, neiscrpni su samo u slučaju da je brzina njihovog trošenja manja od brzine obnavljanja. Tu se pre svega misli na biomasu ili na neke vidove geotermalne energije.

Pod pojmom **neobnovljivih izvora energije** se podrazumevaju svi potencijalni nosioci nekog vida energije koji su jednom stvoreni, ali se za sada ne mogu obnoviti. Odnosno, brzina stvaranja je daleko manja od brzine trošenja na sadašnjem nivou razvoja. Takvi nosioci energije su fosilna goriva: uglj, nafta, prirodni gas, kao i nuklearna goriva.

Izvori energije se mogu podeliti i u zavisnosti od nosioca energije:

- Hemijska energija (akumulirana u gorivima), *drvo, treset, uglj, sirova nafta, prirodni gas, uljni škrljci, bitumenozni peskovi, biomasa*
- Nosioci potencijalne energije, *vodne snage, plima i oseka*
- Nosioci nuklearne energije, *nuklearna goriva*
- Nosioci kinetičke energije, *vetar, morski talasi*
- Nosioci toplotne energije, *geotermalna energija, toplota mora*
- Nosioci energije zračenja, *Sunčevo zračenje.*

U ovoj podeli može se videti da su skoro svi izvori energije obnovljivi izuzev nosioca hemijske energije (koja je neobnovljiva sem kod biomase).

Hemijska energija je uglavnom akumulirana u gorivima. Ova vrsta goriva nazivaju se **fosilna goriva**.

Da bi se neki izvor energije mogao koristiti u praksi potrebno je prethodno uložiti određenu količinu energije. Odnosno, potrebno je da se ostvari neto energetski efekat. Energija oslobođena sagorevanjem goriva treba da je veća od energije uložene u dobijanje i pripremu goriva. Generalno gledano, u ovom trenutku, ovaj uslov ispunjavaju samo fosilna i nuklearna goriva. Energetski efekat iskorišćenja OIE se stalno povećava, ali je još uvek na relativno niskom nivou.

U nastavku ovih razmatranja pažnja će biti poklonjena fosilnim gorivima (uglju, nafti, prirodnom gasu, gorivim škrljcima), nuklearnim gorivima i nekim oblicima obnovljivih izvora energije.

2.1.2. Energetske rezerve

Sunce kao izvor energije

Sunce je daleko najveći izvor energije u solarnom sistemu. Glavni energetski proces koji se odvija na Suncu je nuklearna fuzija, proces spajanje dva atoma vodonika (H_2) u atom helijuma (He), (spajanje dva laka atoma u jedan teži), uz oslobađanje energije. Nuklearnom fuzijom se u Suncu svake sekunde pretvori oko 700.000.000 tona vodonika u oko 695.000.000 tona helijuma, a razlika od 5.000.000 tona se pretvori po Einstein-ovoj formuli u energiju u obliku gama zračenja. Kada se tih 5.000.000 tona u sekundi pretvori u rad odnosno snagu dobije se da je snaga Sunca oko 386 milijardi milijardi megawata (Za upoređenje: najveća hidrocentrala na svetu „Tri klanca” ima snagu od 18.200 MW, dok Djerdap 1.057 MW). Zemlja u svakom trenutku od Sunca prima 174 petavata ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) solarne radijacije.

Treba reći da je u osnovi svih izvora energije na Zemlji sunčeva energija. Bilo da je kao akumulirana hemijska energija iz procesa fotosinteze (fosilna goriva, biomasa) ili na drugi način transformisana Sunčeva energija (energija vetra, talasa, plime i oseke).

Svetske rezerve fosilnih goriva

Svetske rezerve fosilnih goriva predstavljaju ukupnu količinu fosilnih goriva koje su nastale tokom perioda transformacije fosilnih ostataka biljaka i životinja. U zavisnosti od toga da li su te količine dokazane geološkim ispitivanjima, pretpostavljene na osnovu dokazanih ili su procenjene na osnovu dostupnih znanja napravljena je **Kategorizacija i klasifikacija energetskih rezervi**.

Energetske rezerve (iskoristive rezerve energije - IR) su one količine koje se mogu eksploatirati uz današnju tehnologiju, a da je eksploatacija ekonomski opravdana. Mogu biti svetske, nacionalne, regionalne.

Energetski resursi (poznate rezerve energije - PR), su sve one količine energenata za koje se može pretpostaviti da se nalaze u poznatim nalazištima kojima su istražnim radovima definisani kvalitet i karakteristike ležišta.

Zbir **iskoristivih i poznatih rezervi (rezerve+resursi)** uvećane za dodatne ili **verovatne rezerve** koje se dobijaju procenom nazivaju se **energetski potencijali**.

$$\text{POTENCIJALI} = \text{REZERVE} + \text{RESURSI} + \text{VEROVATNE REZERVE}$$

Dokazane rezerve pojedinih energenata prikazane su u tabeli 1. Iz tabele se vidi da je od svih fosilnih goriva najveća količina uglja. Na drugom mestu je nafta, pa slede zemni gas, gorivi škriljci i dr.

Tabela 1. Dokazane rezerve fosilnih goriva u svetu

Vrste goriva	Količine Na kraju 2011 (10 ⁶ tona)	Energija u ZJ (kraj 2009)
Ugalj	891 530	19,8
Nafta		8,1
Prirodni gas		8,1
Uljni škriljci		

Sources: WEC Member Committees, 2011; data reported for previous WEC reports of Energy Resources; national and international published sources

http://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_resources

2.2. GORIVE MATERIJJE

Sve materije u prirodi mogu se podeliti na dve velike grupe nezapaljive ili **negorive**, i zapaljive ili **gorive**. Ovakva podela nije sasvim precizna jer postoji veliki broj materija koje se mogu svrstati i u jednu i u drugu grupu, a kojoj grupi će neka materija pripasti u konkretnom slučaju, zavisi od vlažnosti, čistoće, usitnjenosti i sličnog. Međutim, ova podela u najvećem broju slučajeva omogućava dobru podelu pa se zato i dalje koristi.

Nezapaljive materije su one materije koje se pod normalnim uslovima neće zapaliti na povišenim temperaturama.

Zapaljive materije su one materije koje se pod normalnim uslovima pale i nastavljaju da gore. To su **gorive materije**. Javljaju se u tri agregatna stanja: čvrstom, tečnom i gasovitom.

Osim zapaljivih i nezapaljivih materija postoje i teško zapaljive ili samogasive materije koje se pale i gore samo dok na njih direktno deluje plamen, a uklanjanjem plamena se gase.

2.3. GORIVA

Gorive materije su supstance koje procesom sagorevanja kao rezultat daju određenu količinu toplote. Mnoge materije sagorevaju, ali samo one koje koristimo za dobijanje energije su **goriva**. Kao takva, goriva danas predstavljaju osnovni izvor za dobijanje toplone energije i ušla su u sve pore naseg života.

Goriva se koriste počev od domaćinstava preko termoenergetskih i termotehničkih postrojenja, motora sa unutrašnjim sagorevanjem do mlaznih i raketnih motora.

Da bi goriva materija bila gorivo u industrijskom smislu, pored toga što emituje određenu količinu energije potrebno je da ispuni još neke uslove:

- Da se u prirodi nalazi u dovoljnoj količini;
- Da procesom sagorevanja proizvodi znatnu količinu toplote u kratkom vremenskom intervalu;
- Da je eksploatacija laka i ekonomična;
- Da imaju mali (prihvatljiv) sadržaj balasta;
- Da ne menjaju bitno sastav i osobine pri skladištenju i transportu,
- Da je sa aspekta bezbednosti prihvatljiva;
- Da je cena dobijene energije ekonomski opravdana
- Da su produkti sagorevanja bezopani po životnu sredinu ili ih je lako moguće smanjiti na prihvatljiv nivo.

Imajući u vidu sve napred navedeno, idealno gorivo ne postoji. Jedan od većih problema su emisija gasova i čvrst otpad koji nastaju tokom sagorevanja goriva. Ovi problemi su veoma složeni jer, pored svega, sagorevanje fosilnih goriva utiče i na klimatske promene, preko efekta staklene bašte. Do trenutka pronalaska „idealnog goriva“ potrebno je racionalno raspolagati energijom pri čemu bi jedna od najefikasnijih mera bila štednja energije.

2.3.1. Podela goriva

Zbog potrebe da se goriva klasifikuju i bolje objasne njihove karakteristike napravljeno je više podela. Osnovna podela goriva je prema njihovom agregatnom stanju, nastanku, načinu dobijanja, primeni kao i prema vrsti izvora energije.

Prema agregatnom stanju goriva se dele na *čvrsta, tečna i gasovita goriva*.

Prema načinu dobijanja dele se na *prirodna i prerađena*. Prirodna goriva su ona goriva koja se nalaze u prirodi i koja se mogu koristiti odmah nakon odstranjivanja grubih primesa. Sva prirodna goriva se mogu prerađivati u cilju poboljšanja njihovog kvaliteta. Veštačka ili proizvedena goriva su ona goriva koja se dobijaju ili preradom prirodnih goriva ili procesom u kome učestvuju i prirodna i veštačka goriva.

Prema nastanku, goriva se mogu podeliti na *fosilna i mineralna*. Fosilna goriva mogu biti biljnog i životinjskog porekla. Ugljevi su nastali iz dominantno akumuliranih ostataka kopnenih biljaka, dok je do nastanka nafte i zemnog gasa došlo akumuliranjem ostataka planktona, algi i bakterija. Mineralna goriva se mogu dobiti direktno iz neorganskih mineralnih materija (nuklearna goriva) ili sintetičkim putem, hemijskim procesima.

Podela goriva **prema primeni** je jedna od najbitnijih. Njihov broj se vremenom povećava shodno potrebama i tehničkim mogućnostima. Pa tako, postoje goriva za peći i ložišta, brodske motore i lokomotive, rakete, nuklearne reaktore, mlazne motore, klipne motore i dr.

Prema vrsti izvora energije goriva se dele na *hemijska* i *nuklearna goriva*.

Prema zastupljenosti u energetici dele se na *konvencionalna* i *alternativna*. Konvencionalni izvori energije su oni izvori čija se upotreba može smatrati uobičajenom i čiji su postupci transformacije poznati. Nekonvencionalni izvori energije su oni čija je upotreba još uvek ograničena, a postupci transformacije i upotrebe nedovoljno ispitani.

U tabeli 2 je prikazana podela prema agregatnom stanju zajedno sa načinom dobijanja.

Tabela 2. Podela goriva prema agregatnom stanju i načinu dobijanja

Goriva prema agregatnom stanju	Goriva prema stepenu prerade		
	Prirodna goriva	Prerađena goriva	
Čvrsta	Drvo Treset Ugljevi Gorivi škriljci Uljani (bitumenozni) pesak	Primarna prerada	Sekundarna prerada
		Drveni ugalj Briketi	Polukoks Koks
Tečna	Nafta	Primarna prerada	Sekundarna prerada
		Benzin Biodiesel Petrolej Dizel gorivo	Loživa ulja i Raketna goriva Kerozin
Gasovita	Prirodni gas, Jamski gas Biogas	Primarna prerada	Sekundarna prerada
		Propan Butan Rafinerijski gas	Destilacioni gas Generatorski gas Sintezni gas

2.3.2. Sastav goriva

Da bi se bolje ocenila mogućnost upotrebe goriva potrebno je detaljno upoznavanje sa njihovim karakteristikama. Najbitnije karakteristike goriva su njegov elementarni sastav i karakteristike koje su važne za njegovu primenu u postrojenjima. Sastav goriva određuje se elementarnom analizom, a osobine goriva koje su važne za njegovu primenu tehničkom analizom. Od elementarnog

sastava goriva zavisi i toplotna moć koja je jedna od najvažnijih karakteristika goriva kada se radi o njegovoj primeni.

2.3.2.1. Elementarna analiza

U opštem slučaju goriva se sastoje iz gorivog i negorivog dela (balasta). Gorivi deo čine ugljenik (C), vodonik (H) i sumpor (S). Negorivi deo čine primese kao što su kiseonik (O) i azot (N) kao i balast. Balast se sastoji iz mineralnih primesa (A) i vode (W). Mineralne materije (primese) u procesu sagorevanja stvaraju pepeo. U praksi se često termin pepeo koristi i za stanje pre sagorevanja. Ovo je pogrešna terminologija jer se sastav mineralnih materija pre i posle sagorevanja menja. Takođe, treba naglasiti da mineralne primese i voda nisu elementi, ali se uslovno uzimaju u elementarnoj analizi i čine takozvanu spoljnu balast.

Ako se uzorak goriva posmatra kao celina (100%), njegov sastav se može predstaviti kao zbir procentualnog učešća pojedinih elemenata:

$$C + H + S + O + N + W + A = 100\%$$

Ili kao zbir gorivog i negorivog dela:

$$\text{GORIVO} = \text{GORIVI DEO (C+H+S)} + \text{PRIMESE (O+N)} + \text{BALAST (W+A)}$$

Elementarni sastav prikazan u jednačini je opšti i važi za sva goriva. U zavisnosti od vrste goriva, nekih elemenata nema ili ih ima u većem ili manjem iznosu. Tipičan primer su mineralne primese kojih u gasovitim gorivima uopšte nema, kod tečnih u malom iznosu, dok su kod čvrstih goriva obavezan sastojak.

Gasovita goriva predstavljaju mešavinu različitih elemenata i jedinjenja koja mogu biti sagorljiva i nesagorljiva. Od sagorljivih najznačajniji su ugljenmonoksid (CO), vodonik (H₂), metan (CH₄), viši ugljovodonici (C_mH_n), dok su nesagorljivi kiseonik (O₂), azot (N₂) i ugljendioksida (CO₂).

Ugljenik je najvažnija komponenta goriva jer njegovim sagorevanjem nastaje najveći deo toplote. Ugljenik je i najviše zastupljena komponenta. Što je sadržaj ugljenika veći utoliko je toplotna moć goriva veća. On se u gorivu nalazi u slobodnom stanju, C_{isp}, ili vezan, C_{fix}, u obliku složenih organskih jedinjenja sa kiseonikom, azotom i sumporom. Prosečni sadržaj ugljenika u nekim gorivima dat je u tabeli 3. Sagorevanjem 1 kg ugljenika oslobađa se 34 MJ toplote, a maksimalna temperatura sagorevanja je 2240°C.

Vodonik je druga po važnosti komponenta goriva jer se sagorevanjem 1kg vodonika oslobađa približno 140 MJ toplote pa je njegov udeo u ukupno proizvedenoj toploti veoma bitan, iako ga u gorivu ima višestruko manje nego ugljenika. Maksimalna temperatura sagorevanja vodonika je 2235°C.

Sumpor se u gorivu nalazi u vidu gorivog (gorivi sumpor) i negorivog (vezanog) sumpora koji ostaje u pepelu nakon sagorevanja.

U uglju se određuju tri vrste sumpora:

- ukupan sumpor, S_u
- gorivi sumpor, S_g i
- vezani sumpor (sumpor u pepelu), S_v .

Ukupni sumpor predstavlja zbir organskog i neorganskog (sulfatni i sulfidni) sumpora:

$$S_u = S_{or} + S_{nor} = S_{or} + (S_{sulfidni} + S_{sulfatni}) = S_g (S_{or} + S_{sulfidni}) + S_v (S_{sulfatni})$$

Organski vezani sumpor, a delom i sulfidni pri sagorijevanju prelaze u SO_2 oslobađajući toplotu, dok sulfatni sumpor zaostaje u pepelu.

Sagorljivi sumpor se dobija kao razlika ukupnog sumpora i sumpora u pepelu.

Iako se sagorevanjem sumpora oslobađa toplota (1 kg sumpora oslobađa približno 9,3 MJ toplote), njegovo prisustvo u gorivu je nepoželjno jer izaziva koroziju, a produkti sagorevanja su ekološki veoma štetni (kisele kiše).

U čvrstim gorivima sumpora ima i do 10%, a u tečnim do 5%. Iako ga u gasovitim gorivima ima manje, ipak se javlja u obliku H_2S i SO_2 .

Kiseonik nije goriv element, već se sagorevanje odvija zahvaljujući njemu. Sagorevanje je hemijska reakcija sjedinjavanja nekog elementa s kiseonikom. U čvrstim gorivima se javlja u vezanom stanju, a u tečnim i gasovitim gorivima ga praktično nema. Kiseonika najviše ima u drvetu i tresetu, a u značajnoj meri i u škriljcima i u nekim ugljevima. Prisustvo kiseonika smanjuje potrebu za kiseonikom iz vazduha, ali „zauzima“ mesto gorivim komponentama, tako da ulazi u tzv. unutrašnji balast.

Azot se javlja u obliku složenih organskih jedinjenja i ima ga veoma malo (do 2 %) u čvrstim i tečnim gorivima, a u većoj meri u proizvedenim gasovitim gorivima. Tokom sagorevanja se ponaša inertno i zajedno sa kiseonikom čini unutrašnji balast.

Vlaga

Vlaga, zajedno sa mineralnim primesama, čini tzv. *spoljnu balast goriva* i kao takva je nepoželjna u gorivu. Vlaga umanjuje toplotnu moć goriva jer se za njeno isparavanje troši deo toplote nastao sagorevanjem goriva. Pored toga, ona svojim prisustvom otežava paljenje, usporava sagorevanje, povećava troškove transporta i otežava manipulaciju.

Vlaga se u gorivu javlja u tri oblika: kao *gruba*, *higroskopska* i *konstitucionalna*.

Gruba vlaga (spoljašnja, površinska, slobodna vlaga) nastaje kao rezultat kvašenja goriva iz spoljne sredine pri dobijanju, transportu i skladištenju goriva.

Gruba vlaga čini najveći deo od ukupne količine vlage u uglju. Određuje se sušenjem uglja na vazduhu.

Higroskopska vlaga (unutrašnja, kapilarna vlaga) se nalazi u porama čvrstog goriva. Ona predstavlja vlagu koju sadrži uzorak suv na vazduhu, a gubi se pri zagrevanju na 105°C do 110°C.

Mineralne materije predstavljaju balast goriva. Njihovo prisustvo smanjuje sadržaj sagorljivih sastojaka goriva, smanjujući na taj način njegovu toplotnu moć. Osim toga, one otežavaju mlevenje goriva i pogoršavaju uslove paljenja u ložištu. Posle sagorevanja, pepeo nastao iz mineralnih materija može da izaziva šljakovanje u sloju uglja, kao i zašljakivanje grejnih površina. Pored toga, čestice letećeg pepela abrazivno deluju na metal smanjujući vek trajanja kotlovskih elemenata.

Mineralne primese najvećim delom (do 98%) čine silikati (uglavnom aluminosilikati), oksidi metala, sulfidi (uglavnom sulfid gvožđa-pirit, FeS_2) i karbonati (kalcijuma, magnezijuma i gvožđa). Tokom procesa sagorevanja mineralne primese prolaze kroz različite faze kompleksnih transformacija što konačno rezultira pojavom materije koja se naziva pepeo. To znači da pepeo predstavlja ostatak polazne materije tokom procesa sagorevanja i posle završetka svih transformacija koje se dešavaju na povišenim temperaturama. Pepeo se, dakle, kvalitativno razlikuje od mineralnih primesa, ali i kvantitativno usled gubitaka konstitucione vode, ugljen-dioksida iz karbonata, sumpor-dioksida usled oksidacije pirita i drugih transformacija.

Elementarna analiza goriva služi za određivanje sastava goriva. U tabeli 3 prikazan je tipičan elementarni sastav karakterističnih vrsta goriva.

Na osnovu elementarne analize može se izračunati:

- Potrebna količina vazduha za potpuno sagorevanje
- Toplotna moć goriva
- Produkti sagorevanja
- Temperatura sagorevanja

Tabela 3. Elementarni sastav pojedinih vrsta goriva (na vazduhu suva masa)

Gorivo	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cl	A (%)	Wh (%)
Čvrsta goriva								
Drvo	50	6	42				4	18-20
Biomasa-Bukva	49.8	6,3	43.2	0,13	0,015	0,005		
Pšenična slama	45,6	5,8	42,4	0,48	0,082	0,19		
Pogača uljane repice	51,5	7,4	30,1	4,97	0,55	0,019		
Treset	54-63	6	30-40					80-90
Škriljci	25	7-10	12-18		2-3		70	1,5
Lignit	60-65	5	25-30	0,7	0,4	< 0,1	7-14 (20)	40-50
Mrki ugalj	60-80	4-6	19-27					
Kameni ugalj	80-98	5	5					
Antracit	92-98	1-3	-					
Drveni ugalj	89-95	3-4	-					
Koks	96	0,3-1	1-3					
Tečna goriva								
Benzin	85	15	-					
Dizel	87	13	-					
Lož ulje	85-86	11-13	1-4	-	-	-	-	-
Mazut	87-88	11-12	0-0,2					
Gasovita goriva								
Prirodni gas	75	25	-	-	-	-	-	-

2.3.2.2. Uslovne mase goriva

U zavisnosti od elementarnog sastava, gorivo se definiše različitim masama: radnom, analitičkom, čistom gorivom i suvom masom.

Sastav goriva posle vađenja iz zemlje, očišćenog od grubih mehaničkih nečistoća i dostavljenog potrošaču na korišćenje, određuje radnu masu goriva. Maseni sastav radne mase goriva, izražen u procentima, može se prikazati jednačinom:

$$C_{(r)} + H_{(r)} + O_{(r)} + N_{(r)} + S_{(r)} + A_{(r)} + W_{H(r)} + W_{G(r)} = 100 \% .$$

Ispitivanja sastava i drugih osobina čvrstih goriva ne mogu se vršiti na uzorku radne mase goriva zbog promenljivog sadržaja grube vlage u zavisnosti od temperature, pritiska i vlažnosti vazduha. Gruba vlaga se zato odstranjuje i dobijeni uzorak služi za analize, pa se masa goriva bez grube vlage naziva analitička masa goriva. Njen maseni sastav može se prikazati izrazom:

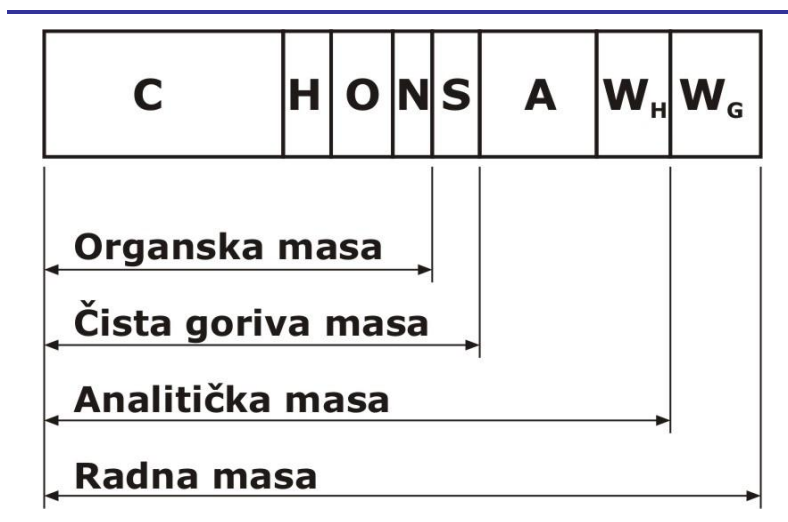
$$C_{(a)} + H_{(a)} + O_{(a)} + N_{(a)} + S_{(a)} + A_{(a)} + W_{H(a)} = 100 \% .$$

Čistu gorivu masu goriva čine ugljenik, vodonik i sumpor. Pošto se kiseonik, koji samo potpomaže proces sagorevanja, i azot, koji je inertan, u gorivu nalaze vezani sa ostalim elementima, uslovno ih uključujemo u čistu gorivu masu. Njen sastav je onda:

$$C_{(g)} + H_{(g)} + O_{(g)} + N_{(g)} + S_{(g)} = 100 \% .$$

Isključujući svu vlagu, mineralne primese (pepeo) i sumpor, dobijamo organsku masu goriva. Ovaj sastav je takođe uslovan, jer se sumpor nalazi u gorivu u vidu organskih jedinjenja. Maseni sastav organske mase u procentima je dat izrazom:

$$C_{(o)} + H_{(o)} + O_{(o)} + N_{(o)} = 100 \% .$$



Slika 1. Uslovne mase goriva

Preračunavanja sa jedne uslovne mase na drugu vrše se odgovarajućim izrazima. U Tabeli 4 su dati izrazi za preračunavanja analitičke mase na radnu, gorivu i organsku. Za jednoznačno određivanje procentualnog masenog sastava radne mase na osnovu analitičke mase goriva, potrebno je poznavati i maseni udeo grube vlage u radnoj masi goriva, $W_{G(r)}$.

U neisparljive

Gorive materije	Gorivi (fiksni) ugljenik	C_{fix} , %
Sumpor slobodni	S_{sl} , %	
Negorive materije	Sumpor vezani	S_{vez} , %
Mineralne materije	A, %	

Gorivi (fiksni) ugljenik zajedno sa slobodnim sumporom i mineralnim primesama čini **koksnii ostatak, K**.

S obzirom na složenost materije čvrstih goriva, i u isparljivom i u neisparljivom delu goriva mogu se naći gorive i negorive komponente.

Može se reći da osnovni deo tehnička analiza goriva podrazumeva:

- sadržaj grube i hidroskopske vlage,
- sadržaj gorivih isparljivih materija (volatili),
- sadržaj mineralnih materija,
- sadržaj koksnog ostatka.

Pored ovih osnovnih informacija, tehnička analiza ima i dodatne sadržaje kao što je toplotna moć goriva, ponašanje pepela na povišenim temperaturama, isged i struktura koksnog ostatka i dr.

2.3.3. Toplotna moć

Toplotna moć goriva se definiše kao odnos oslobođene količine toplote pri potpunom sagorevanju goriva i količine goriva iz koje je toplota oslobođena:

$$H = \frac{Q}{m_g},$$

gde je:

- H - toplotna moć goriva, u kJ/kg,
 Q - količina oslobođene toplote, u kJ,
 m_g - masa goriva, u kg.

Vlaga umanjuje toplotnu moć goriva jer se za njeno isparavanje troši deo toplote nastao sagorevanjem goriva. Shodno tome, razlikujemo *gornju* i *donju toplotnu moć goriva*.

Gornja toplotna moć goriva - toplota sagorevanja (H_g) je količina toplote koja se oslobodi potpunim sagorevanjem jedinice mase goriva pod sledećim uslovima:

- voda iz produkata sagorevanja, koja potiče od vlage iz goriva i od sagorelog vodonika (H_2), prevedena je u tečno stanje,
- produkti sagorevanja goriva dovedeni su na temperaturu koju je gorivo imalo na početku i
- sumpor (S) i ugljenik (C) iz gorive materije se nalaze u obliku svojih dioksida (SO_2 i CO_2), dok do sagorevanja azota (N_2) nije došlo.

Donja toplotna moć goriva – toplotna vrednost (H_d) je količina toplote koja se oslobodi potpunim sagorevanjem jedinice mase goriva pod sledećim uslovima:

- voda u produktima sagorevanja ostaje u parnom stanju,
- produkti sagorevanja goriva dovedeni su na temperaturu koju je gorivo imalo na početku i
- sumpor (S) i ugljenik (C) iz gorive materije se nalaze u obliku svojih dioksida (SO_2 i CO_2), dok do sagorevanja azota (N_2) nije došlo.

Veza između gornje i donje toplotne moći kod čvrstih goriva može se predstaviti relacijom:

$$H_g = H_d + 25 \cdot (9H + W_U),$$

gde je:

- H_g - gornja toplotna moć goriva, u kJ/kg,
 H_d - donja toplotna moć goriva, u kJ/kg,
 25 - stoti deo zaokružene vrednosti latentne toplote isparavanja vode ($r=2450$ kJ/kg), u kJ/kg,
 W_U - sadržaj ukupne vlage u uzorku goriva, u %, jednak sumi sadržaja grube i higroskopne vlage:

$$W_U = W_G + W_H,$$

- W_G - sadržaj grube vlage u uzorku goriva, u %,
 W_H - sadržaj higroskopne vlage u uzorku goriva, u % i
 H - sadržaj vodonika u uzorku goriva, u %.

$9H$ u jednačini predstavlja količinu vode nastalu sagorevanjem vodonika (H_2) iz goriva, u procentima, %.

Toplotna moć se može izračunati eksperimentalnim putem (određivanje na vežbama) ili analitičkim (računskim) putem, ako je poznat elementarni sastav goriva, pomoću izraza:

$$H_{g(a)} = 340 \cdot C_{(a)} + 1420 \cdot \left(H_{(a)} - \frac{O_{(a)}}{8} \right) + 93 \cdot S_{(a)} \text{ i}$$

$$H_{d(a)} = 340 \cdot C_{(a)} + 1190 \cdot \left(H_{(a)} - \frac{O_{(a)}}{8} \right) + 93 \cdot S_{(a)} - 25W_{H(a)}.$$

Preračunavanje toplotnih moći sa analitičke na radnu uslovnu masu goriva vrši se pomoću izraza:

$$H_{g(r)} = H_{s(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100} \text{ i}$$

$$H_{d(r)} = H_{i(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100} - 25 \cdot W_{G(r)}.$$

Slično je sa preračunavanjem toplotnih moći analitičke na toplotne moći gorive mase:

$$H_{g(g)} = H_{s(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)})} \text{ i}$$

$$H_{d(g)} = (H_{i(a)} + 25 \cdot W_{H(a)}) \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)})}.$$

Gornja toplotna moć drvene biomase se može dovoljno tačno izračunati kada je poznat elementarni hemijski sastav drveta, uz pomoć prilagođenog obrasca / 22/:

$$H_g = 340 \cdot C_{(a)} + 1420,5 \cdot \left(H_{(a)} - \frac{O_{(a)}}{10} \right)$$

Obrazac za donju toplotnu moć drveta je:

$$H_d = \frac{1}{1 + \frac{W_u}{100}} \cdot \left(H_d - 2500 \frac{W_u + 9H}{100} \right) + 105 \cdot S$$

gde su: C, H, O i S - procentualna masena učešća ugljenika, vodonika, kiseonika i sumpora u apsolutno suvom drvetu.

Za izračunavanje **toplotne moći otpada** koristi se sledeća jednačina Schwanecke-a (1976):

$$H_d = 348 \cdot C + 949 \cdot H + 105 \cdot S + 63 \cdot N - 108 \cdot O - 24,5W_u$$

U narednoj tabeli (5) date su vrednosti gornjih i donjih toplotnih moći karakterističnih vrsta čvrstih, tečnih i gasovitih goriva.

Tabela 5. Toplotne moći karakterističnih vrsta goriva

Vrsta goriva	Donja toplotna moć, MJ/kg	Gornja toplotna moć, MJ/kg
Čvrsta goriva		
Drvo (30% vlage)	13,5	18,2
(15% vlage)	15,4	18,2
Briketi i peleti	18	18
Kukuruzovina	13.7	
Šećerna trska	15.058	16.35
Sojina sačma	15.2	
Treset	6,3-8,4	
Lignit	7.5-12.5	
Mrki ugalj	12,5-23,87	
Kameni ugalj	23,87-36	
Antracit	36.4-36.8	
Gorivi škriljci	6-10	
Tečna goriva		
Sirova nafta	42.686	45.543
Benzin	43.448	46.536
Dizel gorivo	42.791	45.766
Biodizel	36.700	40.168
Metanol	20.094	22.884
Etanol	26.952	29847
Butan	45.277	49.210
Propan	46.298	50.235
TNG	46.607	50,152
Gasovita goriva		
Vodonik	120.21	142.18
Metan	50.080	55.560
Etan	47.520	51.920
Prirodni gas	47.141	52.225
Biogas	26.800	

Izvor: GREET, The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use In Transportation Model, GREET 1.8d.1, developed by Argonne National Laboratory, Argonne, IL, released August 26, 2010. <http://greet.es.anl.gov/>
 Gradimir Danon **ENERGETIKA U DRVNOJ INDUSTRIJI**, Šumarski fakultet Beograd

2.4. SAGOREVANJE

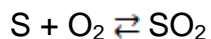
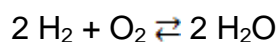
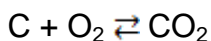
Sagorijevanje je složen fizičko-hemijski proces pri kome se iz gorive materije oslobadja hemijski vezana toplota i to kao rezultat vezivanja kiseonika sa sagorivim sastojcima u materijalu. Proces vezivanja kiseonika sa drugim materijama naziva **oksidacijom**, ali svaka oksidacija nije i sagorevanje. Da bi smo proces oksidacije mogli smatrati sagorevanjem potrebno je da bude praćena izdvajanjem znatne količine toplote i svetlosti, a takva oksidacija se naziva **burna oksidacija**.

Da bi otpočeo proces sagorijevanja mora da postoji ono što gori (goriva materija), kiseonik (oksidator) i dovoljnu količinu toplotne energije neophodne za početak gorenja (izvor paljenja). Ono što se dobija nakon sagorevanja goriva su produkti sagorevanja i energija.

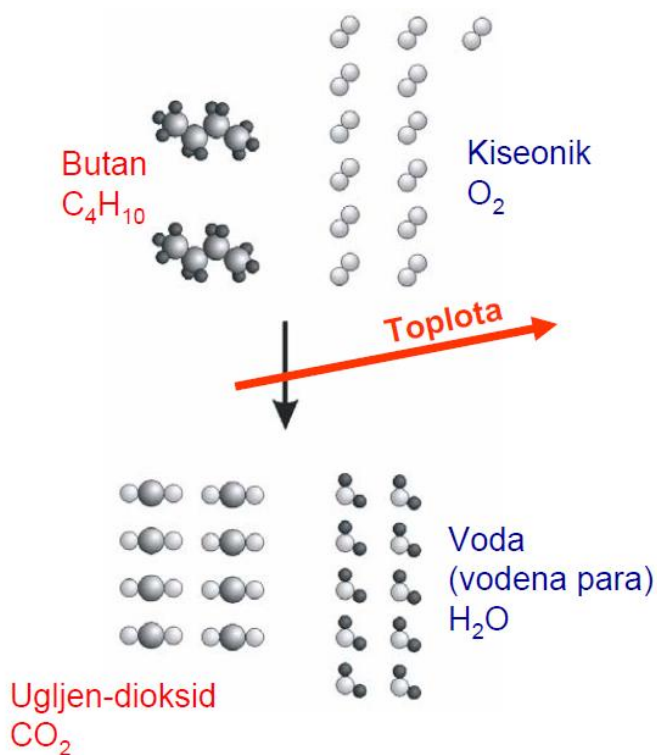
Gorivo + O₂ = Produkti sagorevanja + Energija

Teorijski posmatrano sagorevanje će biti uvek potpuno ako je količina kiseonika, dovedena u process, veća ili najmanje jednaka minimalno potrebnoj količini kiseonika za potpuno sagorevanje i obrnuto, sagorevanje će biti uvek nepotpuno, ako je količina kiseonika koja učestvuje u procesu sagorevanja manja od minimalno potrebne. Potpunim sagorevanjem dobija se ukupna, maksimalna količina toplote, sadržana u gorivu, dok pri nepotpunom imamo uvek određene gubitke.

2.4.1. Potpuno sagorevanje je takvo sagorevanje u kome gorivi sastojci potpuno sagorevaju u kiseoniku, stvarajući ograničen broj proizvoda. Potpuno sagorevanje je proces u kome su završeni svi oksidacioni procesi i u produktima sagorevanja nema više gorivih elemenata. Produkti sagorevanja kod potpunog sagorevanja su: CO₂, H₂O, SO₂ i N₂.

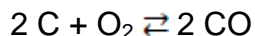


Na sledećoj slici prikazan je mehanizam potpunog sagorevanja butana.



Slika 2. Mehanizam potpunog sagorevanja butana

2.4.2. Nepotpuno sagorevanje se javlja samo onda kada nema dovoljno kiseonika koji bi gorivu omogućio potpunu reakciju pri stvaranju ugljenidioksida i vode. Nepotpuno sagorevanje se karakteriše time da se nakon završetka svih oksidacionih procesa, pored produkata potpunog sagorevanja nalaze i produkti nepotpunog sagorevanja (ugljenik), kao i produkti raspadanja gorive materije. Tada se u produktima procesa nalaze: CO_2 , H_2O , SO_2 , H_2 , CO , C_mH_n i N_2 .



Količina toplote koja se proizvodi tokom sagorevanja najveća je prilikom potpunog sagorevanja.

Proces sagorevanja može biti savršen i nesavršen. I pored obezbeđivanja dovoljne količine kiseonika za potpuno sagorevanje, pa čak i veće od minimalno potrebne, u produktima sagorevanja nalazimo nepotpuno sagorevanje ili čak nagorele komponente goriva – usled nesavršenog sagorevanja.

Zavisno od agregatnog stanja komponenata koje učestvuju u procesu (goriva i oksidatora – najčešće vazduh) sagorevanje može biti homogeno, ako su gorivo i vazduh u istom agregatnom stanju (primer sagorevanja gasovitih goriva) i heterogeno, ako su gorivo i vazduh u različitim agregatnim stanjima (primer sagorevanja čvrstog goriva – uglja).

2.4.3. Stehiometrijske jednačine sagorevanja

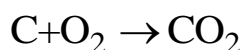
Stehiometrijske jednačine sagorevanja su jednačine koje daju informacije o:

- međusobnim odnosima u kojima se jedine gorivi elementi ugljenik, vodonik i sumpor sa kiseonikom,
- količini kiseonika odn. vazduha potrebnoj za potpuno sagorevanje,
- količini nastalih produkata sagorevanja, kao i
- količini toplote se tom prilikom obrazuje,

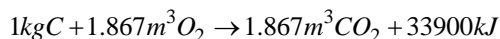
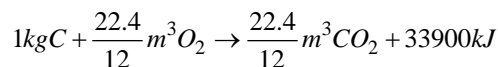
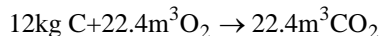
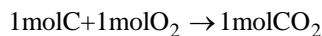
Ove jednačine, napisane za sve gorive elemente, istovremeno omogućavaju odgovarajući proračun za bilo koje realno gorivo. Prilikom daljeg razmatranja, treba voditi računa da je proces sagorevanja krajnje složen i da stehiometrijske jednačine sagorevanja daju samo početne i krajnje komponente ne ulazeći u komplikovani mehanizam reakcija koje se odvijaju između komponenata između početnog i krajnjeg stanja.

Sagorevanje ugljenika.

Reakciju potpunog sagorevanja ugljenika možemo izraziti jednačinom:



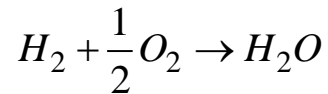
odnosno:



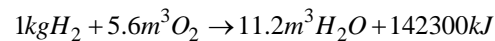
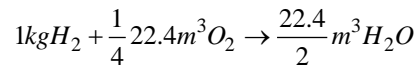
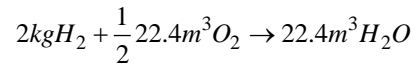
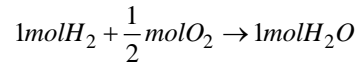
To znači da jedan kilogram ugljenika pri potpunom sagorevanju troši 1,867 normalnih kubnih metara kiseonika, kao rezultat procesa nastaje 1,867 normalnih kubnih metara ugljendioksida i količina toplote od 33900 kJ.

Sagorevanje vodonika.

Reakciju potpunog sagorevanja vodonika izražavamo jednačinom:

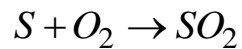


odnosno:



Sagorevanje sumpora.

Reakcija potpunog sagorevanja sumpora glasi:



odnosno:

