

Izgaranje

Izgaranje predstavlja jednu od temeljnih energetske pretvorbi kojim se primarni oblici energije koji su nositelji kemijske energije transformiraju u toplinsku energiju. Fosilna goriva za svoju pretvorbu u toplinsku energiju moraju proći proces izgaranja. U prethodnim predavanjima vidjelo se da se jedino ugljen može bez značajnije pripreme koristiti kao energent, dok je kod prirodnog plina, a posebno nafte potreban niz složenih tehnoloških postupaka koji osnovnu sirovinu pretvaraju u oblik pogodan za korištenje u procesu izgaranja. Goriva se, ovisno u kojem se agregatnom stanju nalaze pri sobnoj temperaturi, dijele na:

- kruta,
- kapljevita (tekuća) i
- plinovita.

Svim vrstama fosilnih goriva, bez obzira da li se nalazili u sirovom ili prerađenom obliku zajednički su gorivi sastojci tj elementi koji ih ujedno i čine energentima. To su redom:

- ugljik (C),
- vodik (H) i
- sumpor (S).

Uz gorive sastojke u krutim gorivima pojavljuju se i negorivi sastojci poput, dušika, vode i pepela.

Da bi mogli govoriti o procesu izgaranja nužno je poznavati sastav goriva jer nam to omogućuje definiranje reakcija odn. kemijskih procesa koji nastupaju prilikom procesa izgaranja. To nam je nadalje važno da bi odredili:

- energetska karakteristika goriva i jednako važno
- utjecaj spojeva nastalih reakcijom izgaranja na okoliš.

Donja i gornja toplinska vrijednost goriva

Da bi se proveo energetska proračun bilo kojeg procesa u kojem se pojavljuje pretvorba goriva koje je nositelj kemijske energije potrebno je poznavati energetska vrijednost tog goriva. Ta energetska vrijednost goriva naziva se toplinska vrijednost goriva, a još se mogu naći u uporabi pojmovi ogrjevna vrijednost ili toplinska moć goriva. Razlikujemo donju i gornju toplinsku vrijednost.

Donja toplinska vrijednost goriva predstavlja količinu toplinske energije koja se oslobodila izgaranjem jedinice mase ili volumena krutog, tekućeg ili plinovitog goriva ali tako da u toj količini toplinske energije nije sadržan iznos latentna topline vodene pare koja se nalazi u dimnim plinovima koji su nastali izgaranjem tog goriva jer ta vodena para zadržava plinovito agregatno stanje.

Gornja toplinska vrijednost goriva predstavlja količinu toplinske energije koja se oslobodila izgaranjem jedinice mase ili volumena krutog, tekućeg ili plinovitog goriva ali tako da u toj količini toplinske energije jest sadržan iznos latentna topline vodene pare koja se nalazi u dimnim plinovima koji su nastali izgaranjem tog goriva.

Dakle, gornja toplinska vrijednost goriva veća je od donje samo za iznos latentne topline vodene pare koja je kondenzirala u dimnim plinovima.

Toplinske vrijednosti određuju se u pravilu u laboratorijskim uvjetima izgaranjem ispitivanog goriva i mjerenjem topline. Na temelju tih podataka dobiveni su i neki empirijski izrazi koji su dani u nastavku.

Sastav krutih i tekućih goriva

Iako su gorivi elementi sadržani u spojevima uobičajeno je kod krutih i tekućih goriva iskazivati sastav prema elementarnom udjelu pojedinog gorivog elementa kako slijedi:

$$C + H + S + O + N + A + W = 100\% \quad (1)$$

gdje je:

C-udio ugljika, %,

H-udio vodika, %,

S-udio sumpora, %,

O-udio kisika, %,

N-udio dušika, %,

A-udio pepela, %,

W-udio vode, %.

Ukoliko se iz goriva izdvoji udio vode W dobiva se udio suhe tvari. Tada gornji izraz prelazi u:

$$C' + H' + S' + O' + N' + A' = 100\% \quad (2)$$

Ako se iz gornjeg izraza uz udio vode W izdvoji i udio pepela A dobiva se udio suhe tvari bez pepela iz čega slijedi izraz:

$$C'' + H'' + S'' + O'' + N'' = 100\% \quad (3)$$

Ovime su promijenjeni i postoci jer je lijeva strana iz izraza (1) umanjena za W odn. W-A. Postoji veza između članova u izrazima (1) i (2) i (3) koja se dobije prebacivanjem W odn. W-A u izrazu (1) na desnu stranu i dijeljenjem cijelog izraza desnom stranom. Tako je npr veza za udio ugljika:

$$C' = \frac{C}{100 - W} \quad (4a) \quad C'' = \frac{C}{100 - A - W} \quad (4b)$$

Na isti način mogu se dobiti odnosi i za ostale sastojke.

Sastav plinovitih goriva

Za razliku od krutih i tekućih goriva sastav plinovitih goriva uobičajeno se iskazuje udjelom pojedinih spojeva odn. molekula plinova koje se nalaze u sastavu plinovitog goriva. Većina plinovitih goriva je smjesa više sastojaka.

$$CH_4 + CO + H_2 + \dots + C_n H_m + O_2 + CO_2 + N_2 = 100\% \quad (5)$$

Nakon što je poznat sastav goriva moguće je izračunati donju i gornju toplinsku vrijednost prema empirijskim izrazima. Praktično se ove dvije veličine određuju laboratorijski u uređajima koji se nazivaju kalorimetrijska bomba. Donju i gornju toplinsku vrijednost krutih i kapljevitih goriva moguće je izračunati prema sljedećem empirijskom izrazu:

$$H_d = 34,8 \cdot C + 93,9 \cdot H + 10,46 \cdot S + 6,28 \cdot N - 10,8 \cdot O - 2,5 \cdot W \quad \left[\frac{MJ}{kg_{goriva}} \right] \quad (6)$$

Udjeli pojedinih sastojaka dani su u jedinici $\left[\frac{kg}{kg_{goriva}} \right]$ pa se uvrštavaju kao decimalni broj, a ne kao postotak.

Za goriva koja su proizvodi nafte (kapljevita) koristi se i sljedeći izraz:

$$H_d = 33,15 \cdot C + 94,1 \cdot H + 10,46 \cdot (S - O) \quad \left[\frac{MJ}{kg_{goriva}} \right] \quad (7)$$

Gornja toplinska vrijednost u oba slučaja računa se prema:

$$H_g = H_d + 2,5 \cdot (9 \cdot H + W) \quad \left[\frac{MJ}{kg_{goriva}} \right] \quad (8)$$

Za plinovita goriva donja toplinska vrijednost može se izračunati prema empirijskom izrazu:

$$H_d = 358 \cdot CH_4 + 636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1158 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12} \quad (9)$$

Obzirom na način iskazivanja sastava plinovitog goriva prema izrazu (5) praktičnije je računati donju i gornju toplinsku vrijednost sumiranjem toplinskih vrijednosti pojedinih sastojaka ovisno o njihovom volumnom udjelu i to kako slijedi:

$$H_d = \sum r_i \cdot H_{di} \quad (10)$$

$$H_g = \sum r_i \cdot H_{gi} \quad (11)$$

gdje je r_i udio pojedinog sastojka plinovitog goriva, prema prethodnim oznakama redom CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 itd. Vrijednosti toplinskih vrijednosti nekih spojeva dane su tablicom 1.

Tablica 1. Donje i gornje toplinske vrijednosti nekih plinova

Sastojak-plin	Formula	H_d , MJ/m ³	H_g , MJ/m ³
Vodik	H ₂	10,81	12,78
Ugljični monoksid	CO	12,64	12,64
Metan	CH ₄	35,93	39,87
Acetilen	C ₂ H ₂	56,9	58,9
Etilen	C ₂ H ₄	59,55	63,5
Etan	C ₂ H ₆	64,5	70,45
Propan	C ₃ H ₈	93	101
Butan	C ₄ H ₁₀	123,8	134

Benzol	C_6H_6	144	150,3
Sumporovodik	H_2S	28,14	30,3

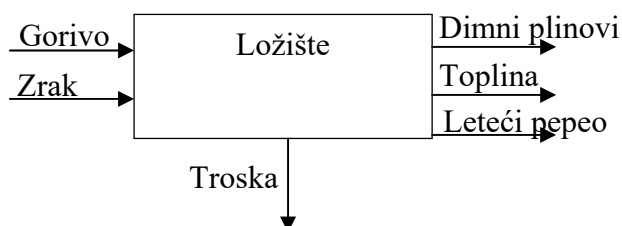
Stehiometrijski odnosi u procesu izgaranja

Izgaranja je kemijski proces pri kojem dolazi do oksidacije gorivih elementa pri čemu se oslobađaju značajne količine toplinske energije, dakle to je egzoterman proces. Gorivi elementi su ugljik (C), vodik (H) i sumpor (S). Samo izgaranje je vrlo složen proces, a o toku samog procesa ovisi i iskorištenje goriva i emisija spojeva koji u tom procesu nastaju.

Za početak je potrebno odrediti stehiometrijske odnose u procesu izgaranja za pojedine gorive elemente ili spojeve što je osnova za sva daljnja razmatranja.

Zato je potrebno postaviti model ložišta kako je to prikazano slikom 1. Taj model ne ulazi u sam proces izgaranja koji se odvija u ložištu već gleda samo ulazne i izlazne masene tokove. Može se reći da je to model „crne kutije“ (black box) i on je uobičajen u literaturi, ali je važno upozoriti na ograničenost takvog pristupa. Za cjelovito poznavanje i razumijevanje procesa izgaranja i njegovih ukupnih posljedica, presudne su upravo pojave koje se događaju u samom ložištu.

Slika 1. Model ložišta kao osnovica za postavljanje stehiometrijskih odnosa



U ložište ulaze gorivo i zrak koji će u ložištu stupiti u reakciju izgaranja a kao rezultat toga nastat će dimni plinovi (vrući), toplina i leteći pepeo, te troska. Leteći pepeo pojavit će se samo ako ga ima u sastavu goriva ima, a tipičan je za ugljen. Troska je kristalizirani ostatak krutih sastojaka iz goriva, a pojavljuje se isključivo kod korištenja ugljena.

Da bi uopće došlo reakcije potrebno je istovremeno prisustvo tri čimbenika:

- goriva (gorivih elemenata),
- zraka (kisika) i
- temperature paljenja.

Stehiometrijske jednadžbe izgaranja krutih i kapljevitih goriva

Za svaki gorivi element mogu se postaviti odgovarajući stehiometrijski odnosi izgaranja. Reakcijom spajanja ugljika (C) i kisika (O_2) nastaje ugljični dioksid (CO_2) uz oslobađanje topline:



Izraženo u kmol to je:



a uvrštavanjem mase 1kmol pojedinog sudionika slijedi:



Priredio i sastavio: prof. dr. sc. Igor Sutlović

Podijelimo li obje strane prethodnog izraza sa 12 kako bi dobili masu kisika potrebnu za izgaranje 1kg ugljika i masu ugljičnog dioksida nastalu izgaranjem



Obzirom da je praktičnije izražavati plin u jedinici volumena, a ne mase izraz (14), uz poznatu činjenicu da 1kmol bilo kojeg plina ima volumen 22,4m³ pri standardnim uvjetima, može se pisati:



Svedeno na 1kg ugljika daje:

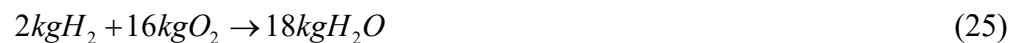
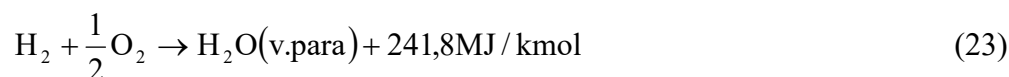


Ove relacije vrijede za potpuno izgaranje. U slučaju nepotpunog izgaranja, odn. kada bi se atomu ugljika dovelo pola molekule (atom) kisika: dobio bi se ugljični monoksid. Slijedeći prethodnu logiku reakcije se mogu pisati kako slijedi:



Redom za ostale gorive elemente vrijedi:

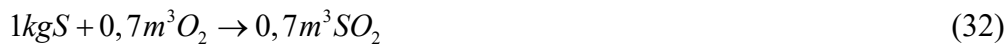
vodik:



sumpor:



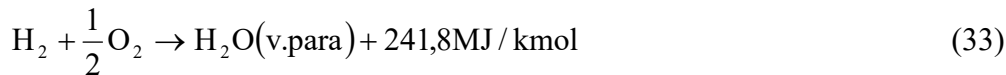
Priredio i sastavio: prof. dr. sc. Igor Sutlović



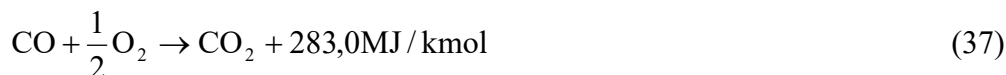
Stehiometrijske jednadžbe izgaranja plinovitih goriva

Za plinovita goriva čiji je sastav iskazan prema izrazu (5) reakcije izgaranja za vodik, ugljični monoksid (kao sastojak goriva), metan i općenito bilo kojeg ugljikovodika izgledaju kako slijedi:

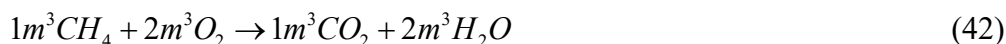
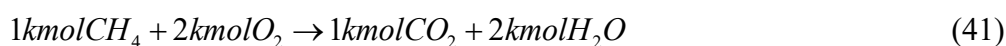
vodik:



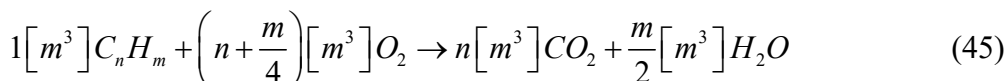
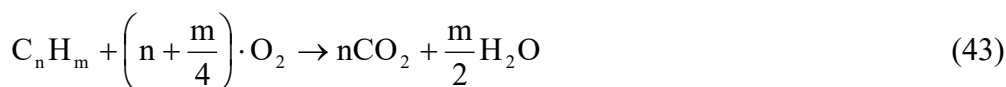
ugljični monoksid:



metan:



ugljikovodici općenito:



U izrazima (43), (44) i (45) je n - broj C atoma, m – broj H atoma, a u izrazu (42) veličina u uglatoj zagradi $[\text{m}^3]$ označava jedinicu volumena kubni metar.

Stehiometrijski izrazi (12) do (45) uspostavili su vezu između pojedinih gorivih elemenata ili spojeva i količine kisika potrebne da bi ta reakcija odigrala. Ti izrazi su polazište za izračunavanje potrebne količine kisika odn. zraka koja će biti potrebna za potpuno izgaranje goriva poznatog sastava.

Za kruta i kapljevita goriva prema jednadžbama (17), (27) i (32) minimalna količina zraka je:

$$O_{\min} = \frac{8}{3}C + 8H + S - O \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \right] \quad (46)$$

Obzirom da kisik ne nalazimo u elementarnom obliku u prirodi, nego ćemo za izgaranje koristiti zrak možemo pisati:

$$G_{\text{zrak min}} = 11,49 \cdot C + 34,48 \cdot H + 4,31 \cdot (S - O) \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \right] \quad (47)$$

Podsjetimo da je zrak mješavina 21% (vol) kisika (O_2) i 79% (vol) dušika (N_2). Da bi izraz (46) preveli u izraz (47) potrebni su nam maseni omjeri kisika i dušika koji se dobivaju prema:

$$g_{O_2} = 0,21 \cdot \frac{M_{O_2}}{M_{\text{zraka}}} = 0,21 \cdot \frac{32}{28,96} = 0,232 \quad (48)$$

$$g_{N_2} = 0,79 \cdot \frac{M_{N_2}}{M_{\text{zraka}}} = 0,79 \cdot \frac{28,16}{28,96} = 0,768 \quad (49)$$

Tako dijeljenjem izraza (46) vrijednošću dobivenu izrazom (48) dobivamo masu zraka potrebnu za izgaranje određenog goriva.

Obzirom da je zrak plin, to će nam još praktičnije poslužiti volumen zraka kojeg ćemo dobiti dijeljenjem gustoćom zraka $\rho_z = 1,292 \text{ kg/m}^3$ (pri standardnim uvjetima).

$$V_{\text{zrak min}} = 8,88 \cdot C + 26,44 \cdot H + 3,33 \cdot (S - O) \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \right] \quad (50)$$

Za plinovita goriva prema izrazima (36), (39), (42) i (45), te uz korištenje volumenskog udjela kisika (21%) u zraku dobiva se minimalna potrebna količina zraka za izgaranje plinovitog goriva:

$$V_{\text{zrak min}} = 4,76 \cdot \left[0,5 \cdot (H_2 + CO) + 2CH_4 + \left(n + \frac{m}{4} \right) \cdot C_n H_m + 1,5H_2S - O_2 \right] \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3_{\text{plina}}} \right] \quad (51)$$

U praksi sve vrste goriva izgaraju s količinom zraka u pravilu većom od one stehiometrijske. Zbog toga se uvodi pojam suviška ili pretička zraka λ . Uvođenjem ove veličine počinjemo govoriti o stvarnoj količini zraka koja se računa kao:

$$V_{\text{zrak}} = \lambda \cdot V_{\text{zrak min}} \quad (52)$$

Suvišak zraka u procesu izgaranja nužan je za potpuno iskorištenje goriva jer praktično to nije uvijek moguće postići sa stehiometrijskom količinom zraka. Ove vrijednosti nisu proizvoljne jer o količini zraka ovise dvije važne posljedice. Prevelika količina zraka dovest će do hlađenja plamena i slabijeg energetskog iskorištenja goriva, a također zahtijeva i odgovarajuće veće dimenzije kanala kojima prolaze zrak i dimni plinovi. O količini zraka između ostalog ovisi i nastanak grupe NO_x spojeva što nije vidljivo iz do sada promatranog modela ložišta, a o čemu će biti posebno govora. Općenito, vrijednosti pretička zraka ovise o vrsti goriva i kreću se od 3 do 10% za plinovita goriva ($\lambda = 1,03 - 1,01$) i od 5 do 35% za kapljevita i kruta goriva, sve u odnosu na stehiometrijske potrebne količine zraka.

Volumen dimnih plinova

Volumen dimnih plinova dobiva se zbrajanjem volumena pojedinih sastojaka dobivenih u procesu izgaranja. Te veličine su bitne za određivanje emisije dimnih plinova i utjecaja na okoliš nekog postrojenja kao i za termodinamičke proračune jer su dimni plinovi sa svojom povišenom temperaturom nositelji toplinske energije.

Kruta i kapljevita goriva

Prema sastavu goriva iskazanom izrazom (1), stehiometrijskim odnosima danim izrazima (12) do (32), minimalnoj količini zraka izračunatoj prema (50) te uz poznate molarne mase pojedinih sastojaka mogu se izračunati volumeni pojedinih sastojaka dimnih plinova kako slijedi:

$$V_{CO_2} = 1,867 \cdot C \left[\frac{m^3_{CO_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (53)$$

$$V_{SO_2} = 0,68 \cdot S \left[\frac{m^3_{SO_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (54)$$

$$V_{N_2} = 0,8 \cdot N + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min} \left[\frac{m^3_{N_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (55)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{zrak\ min} \left[\frac{m^3_{O_2}}{kg_{goriva}} \right] \quad (56)$$

Zbrajanjem sastojaka izračunatih izrazima (53) do (56) dobiva se volumen suhih dimnih plinova:

$$V_{DPS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \left[\frac{m^3}{kg_{goriva}} \right] \quad (57)$$

Volumen vodene pare računa se prema:

$$V_{H_2O} = 11,11 \cdot H + 1,24 \cdot W + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min} \left[\frac{m^3_{H_2O}}{kg_{goriva}} \right] \quad (58)$$

gdje je d [kg/kg_{suhog zraka}] sadržaj vlage u zraku. Tipične vrijednosti iznose $d=0,002$ za zimu i $d=0,009$ za ljeto.

Pribrajanjem volumena vodene pare volumenu suhих dimnih plinova dobiva se ukupni volumen dimnih plinova (volumen vlažnih dimnih plinova) koji nastaju izgaranjem krutog i kapljevitoг goriva:

$$V_{DP} = V_{DPS} + V_{H_2O} \left[\frac{m^3}{kg_{goriva}} \right] \quad (59)$$

Plinovita goriva

Volumen dimnih plinova kad izgaraju plinovita goriva računa se prema sastavu goriva danom izrazom (5), stehiometrijskim odnosima izgaranja (33) do (45), minimalnom količinom zraka izračunatom izrazom (51):

$$V_{CO_2} = CO_2 + CO + CH_4 + n \cdot C_n H_m \left[\frac{m^3_{CO_2}}{m^3_{plina}} \right] \quad (60)$$

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min} \left[\frac{m^3_{N_2}}{m^3_{plina}} \right] \quad (61)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{zrak\ min} \left[\frac{m^3_{O_2}}{m^3_{plina}} \right] \quad (62)$$

Zbrajanjem volumena sastojaka (60) do (62) dobiva se volumen suhih dimnih plinova:

$$V_{DPS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \left[\frac{m^3}{m^3_{plina}} \right] \quad (63)$$

Volumen vodene pare računa se prema:

$$V_{H_2O} = H_2 + 2CH_4 + \frac{m}{2} C_n H_m + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min} \left[\frac{m^3_{H_2O}}{m^3_{plina}} \right] \quad (64)$$

Pribrajanjem volumena vodene pare volumenu suhih dimnih plinova dobiva se ukupni volumen dimnih plinova (volumen vlažnih dimnih plinova) koji nastaju izgaranjem plinovitog goriva:

$$V_{DP} = V_{DPS} + V_{H_2O} \left[\frac{m^3}{m^3_{plina}} \right] \quad (65)$$

Radi preglednosti izrazi koji će se najčešće koristiti prilikom računanja zadatka iz izgaranja prikazani su tablicom 2.

Tablica 2. Pregled izraza potrebnih za računanja veličina u procesu izgaranja svih vrsta goriva

vrsta goriva	kruto	kapljevito (tekuće)	plinovito
toplinska vrijednost			
Jedinica	MJ/kg _{goriva}		MJ/m ³ _{plina}
donja, H _d ,	$H_d = 34,8 \cdot C + 93,9 \cdot H + 10,46 \cdot S + 6,28 \cdot N - 10,8 \cdot O - 2,5 \cdot W$		$H_d = 358 \cdot CH_4 + 636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1158 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12}$
	-	$H_d = 33,15 \cdot C + 94,1 \cdot H + 10,46 \cdot (S - O)$	$H_d = \sum r_i \cdot H_{di}$ (preferirano)
gornja, H _g	$H_g = H_d + 2,5 \cdot (9 \cdot H + W)$		$H_g = \sum r_i \cdot H_{gi}$
volumen zraka			
Jedinica	m ³ /kg _{goriva}		
minimalni	$V_{zrak\ min} = 8,88 \cdot C + 26,44 \cdot H + 3,33 \cdot (S - O)$		$V_{zrak\ min} = 4,76 \cdot \left[0,5 \cdot (H_2 + CO) + 2CH_4 + \left(n + \frac{m}{4} \right) \cdot C_nH_m + 1,5H_2S - O_2 \right]$
stvarni	$V_{zrak} = \lambda \cdot V_{zrak\ min}$		
dimni plinovi			
Jedinica	m ³ /kg _{goriva}		m ³ /m ³ _{plina}
V _{CO₂}	$V_{CO_2} = 1,867 \cdot C$		$V_{CO_2} = CO_2 + CO + CH_4 + n \cdot C_nH_m$
V _{SO₂}	$V_{SO_2} = 0,68 \cdot S$		-
V _{N₂}	$V_{N_2} = 0,8 \cdot N + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min}$		$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min}$
V _{O₂}	$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{zrak\ min}$		$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{zrak\ min}$
V _{H₂O}	$V_{H_2O} = 11,11 \cdot H + 1,24 \cdot W + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min}$		$V_{H_2O} = H_2 + 2CH_4 + \frac{m}{2} \cdot C_nH_m + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min}$
V _{DPS - suhi}	$V_{DPS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$		
V _{DP - vlažni}	$V_{DP} = V_{DPS} + V_{H_2O}$		

Izrazi (53) do (56) i izraz (58) te izrazi (60) do (62) i izraz (64) daju volumen pojedinih sastojaka dimnih plinova u jedinici volumena (m^3) po jedinici mase (kg_{GORIVA}) ili volumena (m^3_{PLINA}) goriva. Ponekad je zgodno, a posebno se to odnosi na ugljični dioksid, te volumene pretvoriti u masu koristeći jednadžbu stanja idealnog plina za standardne uvjete. Tako se može pisati redom:

- za ugljični dioksid:

$$1m^3CO_2 = 1,96kgCO_2 / kg_{GORIVA} \text{ odn. } 1m^3CO_2 = 1,96kgCO_2 / m^3_{PLINA} \quad (66)$$

- za dušik:

$$1m^3N_2 = 1,25kgN_2 / kg_{GORIVA} \text{ odn. } 1m^3N_2 = 1,25kgN_2 / m^3_{PLINA} \quad (67)$$

- za sumporni dioksid:

$$1m^3SO_2 = 2,86kgSO_2 / kg_{GORIVA} \quad 1m^3SO_2 = 2,86kgSO_2 / m^3_{PLINA} \quad (68)$$

- za kisik:

$$1m^3O_2 = 1,43kgO_2 / kg_{GORIVA} \quad 1m^3O_2 = 1,43kgO_2 / m^3_{PLINA} \quad (69)$$

- za vodenu paru:

$$1m^3H_2O = 0,804gH_2O / kg_{GORIVA} \quad 1m^3SO_2 = 2,86kgSO_2 / m^3_{PLINA} \quad (70)$$

Volumen pojedinih sastojaka kao i ukupni volumen dimnih plinova koriste se i za različite termodinamičke proračune prvenstveno vezane uz energetske potencijal (vrućih) dimnih plinova i izmjenu topline između dimnih plinova i drugih medija, napose vode i zraka. Dimni plinovi su smjesa plinova kao i bilo koja druga smjesa pa za računanje vrijede iste relacije.

Kao polazna relacija koristi se volumenski udio pojedinog sastojka:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{DP}}; \sum r_i = 1 \quad (71)$$

gdje i predstavlja volumen i -tog sastojka dimnih plinova.

Veličina r_i koristi se računanje gustoće dimnih plinova:

$$\rho_{DP} = \sum r_i \cdot \rho_i = 1,977 \cdot r_{CO_2} + 0,804 \cdot r_{H_2O} + 2,931 \cdot r_{SO_2} + 1,257 \cdot r_{N_2} + 1,429 \cdot r_{O_2} + 1,25 \cdot r_{CO} \quad (72)$$

$[kg / m^3]$

gdje brojevi uz volumenske udjele pojedinih sastojaka predstavljaju gustoće tih istih sastojaka pri normiranim uvjetima.

Specifična toplina računa se prema:

$$c_{pDP} = \sum g_i \cdot c_{pi} \quad [kJ / kg_{GORIVA}] \quad (73)$$

gdje je c_p specifična toplina a, g_i maseni udio i -tog sastojka koji se računa prema:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{DP}} = \frac{\rho_i \cdot V_i}{\rho_{DP} \cdot V_{DP}} = \frac{\rho_i}{\rho_{DP}} \cdot r_i = \frac{M_i}{M_{DP}} \cdot r_i \quad (74)$$

gdje i predstavlja masu, gustoću ili molarnu masu i -tog sastojka dimnih plinova.

Entalpija se računa prema izrazu:

$$h_{DP} = V_{DP} \cdot \rho_{DP} \cdot c_{pDP} \cdot t \quad [kJ / kg_{GORIVA}] \text{ ili } [kJ / m^3_{PLINA}] \quad (75)$$

gdje je t temperatura dimnih plinova.

Prethodne veličine ovisne su o temperaturi kao je to objašnjeno u kolegiju „Tehnička termodinamika.“

Obzirom da je proces izgaranja u termoenergetskim postrojenjima jedan od glavnih izvora emisija stakleničkih plinova, a posebno ugljičnog dioksida pojavila se potreba za

usporedbom emisija ugljičnog dioksida u slučaju korištenja različitih goriva izraženo preko donje toplinske vrijednosti H_d goriva. Izraz glasi:

$$g_{CO_2,d} = \frac{V_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2}}{H_d} \left[kg_{CO_2} / MJ \right] \quad (76)$$

Ova vrijednost ipak ne daje potpunu informaciju o tome koliko je učinkovita gorivo iskorišteno pa je puno praktičnije svesti emisiju ugljičnog dioksida na jedinicu proizvedene električne energije, obzirom da većina termoenergetskih postrojenja proizvodi električnu energiju. Tako je:

$$g_{CO_2,el} = \frac{3,6 \cdot V_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2}}{H_d \cdot \eta} \left[kg_{CO_2} / kWh_{el} \right] \quad (77)$$

gdje je η stupanj iskorištenja promatranog termoenergetskog postrojenja. Volumeni ugljičnog dioksida V_{CO_2} u izrazima (76) i (77) uvrstavaju se u $\left[\frac{m^3}{kg_{GORIVA}} \right]$ odn. $\left[\frac{m^3}{m^3_{PLINA}} \right]$.

Vrijednosti dobivene ovim izrazima orijentacijske su ali dobro mogu poslužiti za usporedbu emisija ugljičnog dioksida iz raznih tipova postrojenja.

U tablici 3. dana je jedna takva usporedba.

Tablica 3. Usporedba emisija ugljično dioksida iz različitih vrsta postrojenja za proizvodnju električne energije

Vrsta postrojenja	Snaga, MW	Energent	CO ₂ emisija, kg/kWh
Parno turbinsko postrojenje s pročišćavanjem dp	800	smeđi ugljen	1,04-1,16
Parno turbinsko postrojenje s pročišćavanjem dp	700	kameni ugljen	0,83
Kombinirano postrojenje s plinskom i parnom turbinom s integriranim isplinavanjem ugljena	300	smeđi ugljen	0,91
Kombinirano postrojenje s plinskom i parnom turbinom s integriranim isplinavanjem ugljena	300	kameni ugljen	0,79
Parnoturbinsko postrojenje	400	Lož ulje	0,76
Plinskoturbinsko potrojenje	150	Prirodni plin	0,58
Parnoturbinsko postrojenje	400	Prirodni plin	0,45
Kombinirano postrojenje s plinskom i parnom turbinom	600		0,38
Nuklearna elektrana PWR	1300		0,025
Solarna elektrana	do 80		0,1-0,15
Fotonaponska elektrana	do 6		0,15-0,2
Vjetroelktrana	do 3		0,02
Hidroelektrana	20		0,004

Wobbeov broj

Kao posebna značajka, isključivo kod plinovitih goriva pojavljuje se Wobbeov broj. Njegova vrijednost sastavni je dio izvješća o kvaliteti plinovitih goriva. Definirao ga je 1926. Talijan Goffredo Wobbe. On govori o toplinskom opterećenju plamenika, a praktični mu je značaj u

tome da se na jednom te istom plinskom trošilu mogu koristiti različiti plinovi ukoliko imaju jednaku vrijednost Wobbeovog broja. O tome će biti riječi u nastavku, a sada definirajmo Wobbeov broj:

$$W = \frac{H}{\sqrt{d}} \quad \left[\frac{MJ}{m^3}, \frac{kWh}{m^3} \right] \quad (78)$$

gdje je H toplinska vrijednost $\left[\frac{MJ}{m^3}, \frac{kWh}{m^3} \right]$, a d je relativna gustoća plinovitog goriva definirana kao omjer gustoće plina ρ_{pl} i gustoće zraka ρ_{zr} pri standardnim uvjetima:

$$d = \frac{\rho_{pl}}{\rho_{zr}} \quad [-] \quad (79)$$

Ovisno o tome uvrštavaju li se gornje ili donje toplinske vrijednosti dobit ćemo i vrijednosti gornjeg i donjeg Wobbeovog broja:

$$W_g = \frac{H_g}{\sqrt{d}} \quad (80a) \text{ i}$$

$$W_d = \frac{H_d}{\sqrt{d}} \quad (80b)$$

Uobičajeno se koristi izraz za gornji Wobbeov broj.

U slučaju korištenja različitih plinova s različitim Wobbeovim brojevima potrebno je izvesti preinake na plameniku u smislu promjera mlaznice ili promjene radnog tlaka. Te veličine se ne vide u prethodnim izrazima pa se uvodi pojam proširenog Wobbeovog broja:

$$W \cdot \sqrt{p_m} \cdot D^2 = konst. \quad (81)$$

gdje je p_m [Pa] pretlak na plameniku, a D [m] promjer mlaznice.

Iz izraza (81) lako se dođe do omjera promjera u slučaju korištenja dva plinovita goriva različitih gornjih Wobbeovih goriva označenih indeksima „1“ i „2“ uz $p_m = konst.$:

$$\frac{D_2}{D_1} = \sqrt{\frac{W_{g1}}{W_{g2}}} \quad (82)$$

Na isti način dobiva se omjer pretlaka uz $D = konst.$:

$$\frac{p_{m2}}{p_{m1}} = \left(\frac{W_{g1}}{W_{g2}} \right)^2 \quad (83)$$

Većina plinovitih goriva predstavlja smjesu plinova (npr. prirodni plin, ukapljeni naftni plin itd.) pa se Wobbeov broj takvih smjesa može vrlo jednostavno izračunati korištenjem izraza (11) za računanje gornje toplinske vrijednosti i izraza (72) za gustoću smjese plinova.

Miješanje plinovitih goriva sa zrakom

U praktičnim primjenama može se izvesti specijalni slučaj za smjesu ukapljenog naftnog plina (UNP) i zraka koju nazivamo „miješani plin“. Svrha te smjese je mogućnost alternativnog korištenja umjesto prirodnog plina i obrnuto sve temeljeno na jednakim vrijednostima Wobbeovih brojeva.

Polazne relacije su prema izrazu (11):

$$H_g = r_1 \cdot H_{g1} + r_2 \cdot H_{g2} \left[\frac{MJ}{m^3}, \frac{kWh}{m^3} \right] \quad (84)$$

Nadalje vrijedi:

$$r_1 + r_2 = 1 \quad (85)$$

Izrazi li se udio r_2 iz jednadžbe (85) preko ostalih članova i to se zajedno s izrazom (85) uvrsti u izraz (80a) dobiva se:

$$W_g = \frac{H_g}{\sqrt{d}} = \frac{r_1 \cdot (H_{g1} - H_{g2}) + H_{g2}}{\sqrt{r_1 \cdot (d_1 - d_2) + d_2}} \left[\frac{MJ}{m^3}, \frac{kWh}{m^3} \right] \quad (86)$$

Obzirom da želimo pomiješati plinovito gorivo (npr. UNP) sa zrakom tada indeks „1“ pripada UNP-u a indeks „2“ zraku pa je stoga $d_2=1$ i $H_{g2}=0$ pa uvršteno izraza (86) daje:

$$W_g = \frac{H_g}{\sqrt{d}} = \frac{r_1 \cdot H_{g1}}{\sqrt{r_1 \cdot (d_1 - 1) + 1}} \left[\frac{MJ}{m^3}, \frac{kWh}{m^3} \right] \quad (87)$$

Svrha ovog izraza nije računanje Wobbeovog broja W_g jer je on zadana vrijednost koju želimo postići miješanjem UNP-a gornje toplinske vrijednosti H_{g1} i udjela r_1 sa zrakom. Prema tome iz izraza (87) udio r_1 :

$$r_1 = \left[\left(\frac{W_g}{H_{g1}} \right)^2 \cdot \frac{d_1 - 1}{2} \right] \pm \sqrt{\left[\left(\frac{W_g}{H_{g1}} \right)^2 \cdot \frac{d_1 - 1}{2} \right]^2 + \left(\frac{W_g}{H_{g1}} \right)^2} \quad (88)$$

a udio zraka je:

$$r_2 = 1 - r_1 \quad (89)$$

Radi ilustracije izraza (84) (89) u tablici 4. prikazane su vrijednosti karakterističnih veličina prirodnog i miješanog plina. U tablici su navedene vrijednosti donjih i gornjih toplinskih vrijednosti, Wobbeovih brojeva, gustoća i relativnih gustoća propana, butana, njihove smjese u u omjeru 55/65 (UNP tj. propan butan) te miješanog plina nastalog miješanjem tog UNP-a i zraka u različitim omjerima. Također su dane vrijednosti istih veličina za tri vrste prirodnog plina kako je objašnjeno ispod tablice. Mogu se usporediti vrijednosti gornjih Wobbeovih brojeva za za miješani i prirodni plin. Bolje poklapanje postiglo bi podešavanjem omjera UNP-a i zraka kao i samih omjera propana i butana u UNP-u.

Ako se i postignu iste vrijednosti neće ih biti moguće stalno održavati istima zato jer se vrijednosti sastava prirodnog plina mijenjaju u određenom (dopuštenom) rasponu.

Tablica 4. Vrijednosti karakterističnih veličina plinova i plinskih smjesa

Plin	Formula	Vol. udio, %	H _d , MJ/m ³	H _g , MJ/m ³	H _d , kWh/m ³	H _g , kWh/m ³	W _g , MJ/m ³	W _g , kWh/m ³	Gustoća ρ, kg/m ³	Rel. gustoća d, -
Propan	C ₃ H ₈	100	93	101	25,8	28,06	80,7	22,42	2,011	1,565
Butan	C ₄ H ₁₀	100	123,8	134	34,39	37,22	92,6	25,72	2,708	2,094
Propan/Butan		35/65	113,02	122,45	31,39	34,01	88,69	24,64	2,464	1,906
Miješani plin Propan-butan/zrak		55/45	62,61	67,35	17,39	18,71	55,03	15,28	1,937	1,498
Miješani plin Propan-butan/zrak		50/50	56,51	61,23	15,7	17,0	54,76	15,21	1,615	1,249
Priradni plin ¹	CH ₄ + ...		33,338	37,010	9,26	10,28	49,0	13,6	0,731	0,57
Prir. plin L ²	CH ₄ + ...	82 CH ₄	31,8	35,2	8,83	9,78	44,0	12,2		0,64
Prir. plin H ²	CH ₄ + ...	93 CH ₄	37,3	41,3	10,36	11,47	52,88	14,7		0,61

Gustoća zraka $\rho_{zr}=1,293\text{kg/m}^3$ (Strelec: Plinarski priručnik), ostale gustoće isto

¹Vrijednosti za prirodni plin GP Zagreb

²priradni plin koji se koristi u Njemačkoj, ovdje dan samo radi usporedbe (Recknagel, Sprenger, Schramek: Heizung und Klimatechnik)