



ENERGETIKA

Studij: Kemijsko inženjerstvo (V semestar)

prof. dr. sc. Igor Sutlović



Goriva se dijele na:

- kruta,
- tekuća i
- plinovita

Kruta i tekuća goriva sadrže gorive i negorive sastojke:

- gorivi sastojci su: ugljik, vodik i sumpor, a
- negorivi sastojci su: dušik, pepeo i voda

Kruta i tekuća goriva sadrže gorive i negorive sastojke:

- gorivi sastojci su: ugljik, vodik i sumpor, a
- negorivi sastojci su: dušik, pepeo i voda

Sastojci goriva u procesu izgaranja prolaze energetske transformacije u kojoj nastaju dimni plinovi koji tako postaju nositelji toplinske energije koja se može izravno koristiti kao transformirani oblik, ili pak u generatorima pare svoju toplinu predaju vodi koja isparava u vodenu paru, čime vodena para postaje nositelj toplinske energije.

Za procesu izgaranja uz gorive sastojke potreban je i kisik, a sam proces izgaranja izrazito je egzoterman.

Kruta i tekuća goriva

Sastav krutih i tekućih goriva može se izraziti na tri načina, ovisno o tome što se uzima u obzir.

Uzimajući u obzir sve sastojke vrijedi:

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

Za suhu tvar (bez udjela vode) vrijedi:

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

Za suhu tvar (bez udjela vode) i bez pepela vrijedi:

$$C'' + H'' + S'' + O'' + N'' = 100\%$$

Iz gornjih izraza može se dobiti veza između pojedinih veličina npr. za C , C' i C'' :

$$C' = \frac{C}{100 - W} \quad C'' = \frac{C}{100 - A - W}$$

Donja i gornja toplinska vrijednost goriva

- Donja i gornja toplinska vrijednost goriva razlikuju se za vrijednost latentne topline vodene pare.

Donja toplinska vrijednost goriva H_d u sebi ne sadrži latentnu toplinu vodene pare jer se voda nalazi u obliku vodene pare (parno agregatno stanje), dok je u gornjoj toplinskoj vrijednosti H_g ta vodena para kondenzirala i prešla u kapljevito agregatno stanje (iskorištena je latentna toplina vodene pare)

Za **kruta i tekuća** goriva donja toplinska H_d [MJ/kg] vrijednost računa se prema izrazu:

$$H_d = 34,8 \cdot C + 93,9 \cdot H + 10,46 \cdot S + 6,28 \cdot N - 10,8 \cdot O - 2,5 \cdot W$$

Sastojci C, H, S, N, O i W izraženi su u kg/kg_{GORIVA} (decimalni broj, ne %)!



Za **tekuća** goriva koja su derivati nafte donja toplinska H_d [MJ/kg] vrijednost se može izračunati i prema izrazu:

$$H_d = 33,15 \cdot C + 94,1 \cdot H + 10,46 \cdot (S - O)$$

Gornja toplinska H_g [MJ/kg] vrijednost može se izračunati prema izrazu:

$$H_g = H_d + 2,5 \cdot (9 \cdot H + W)$$

Plinovita goriva

Sastav **plinovitih goriva** može se izraziti na sljedeći način:



gdje su m i n broj C odn. H atoma ugljikovodika alkanskog niza (C_2H_6 -etan, C_3H_8 -propan, C_4H_{10} -butan) i ostalih ugljikovodika C_2H_4 -etilen, C_2H_2 -acetilen itd.)

Gornja H_d [MJ/m^3] i donja toplinska H_g [MJ/m^3] vrijednost **plinovitih goriva** računa se prema sljedećim izrazima:

$$H_d = \sum r_i \cdot H_{di} \qquad H_g = \sum r_i \cdot H_{gi}$$

ili prema empirijskom izrazu:

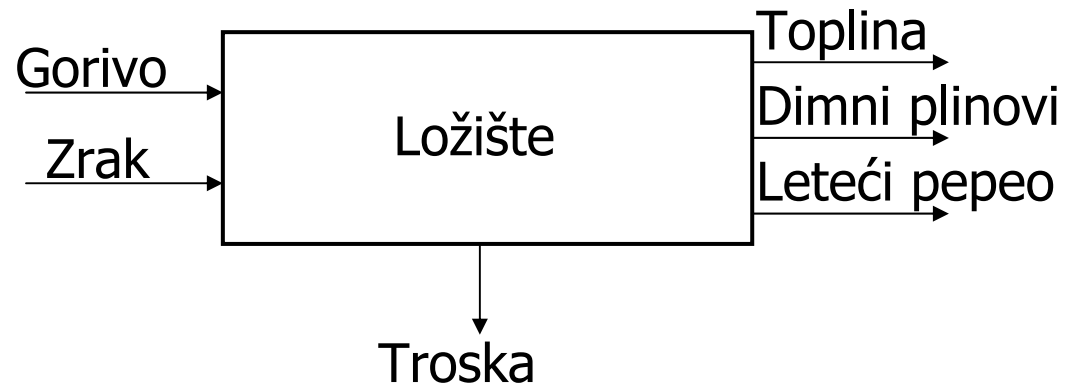
$$H_d = 358 \cdot \text{CH}_4 + 636 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1158 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1465 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}$$

Donje (H_d) i gornje (H_g) toplinske vrijednosti pojedinih sastojaka plinovitih goriva

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 ₆ H ₆	144	150,3
Sumporovodik	H ₂ S	28,14	30,3

Proces izgaranja-stehiometrijski odnosi

Schema procesa izgaranja u ložištu



Proces izgaranja je proces oksidacije gorivih sastojaka iz goriva (C, H, S) u kojem se oslobađaju velike količine topline-egzoterman proces.

Troska nastaje prilikom izgaranja ugljena.

Stehiometrijski odnosi za pojedine sudionike prilikom izgaranja
krutih i tekućih goriva izgledaju ovako-vrijedi za potpuno izgaranje:

Za ugljik C vrijedi: $1\text{kmolC} + 1\text{kmolO}_2 \rightarrow 1\text{kmolCO}_2 + 393,5\text{MJ} / \text{kmol}$



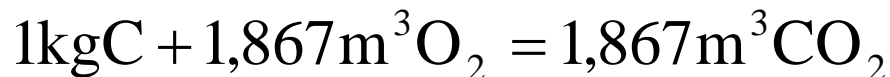
Svedeno na 1kg ugljika treba $8/3$ kg O_2 i dobiva se $11/3$ kg CO_2 odn.:



Kako 1kmol bilo kojeg plina ima volumen od $22,4\text{m}^3$ može se pisati:

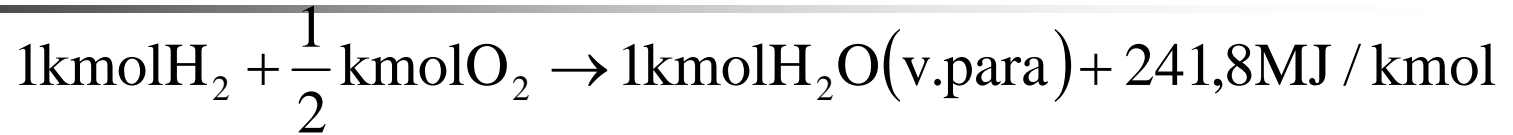


ili svedeno na 1kg C:

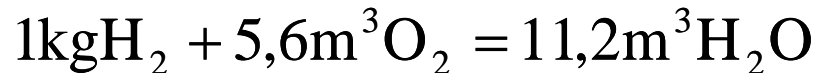




Za **vodik H** vrijedi:



Svedeno na 1kg vodika treba 8kg O₂ i dobiva se 9kg H₂O odn.:



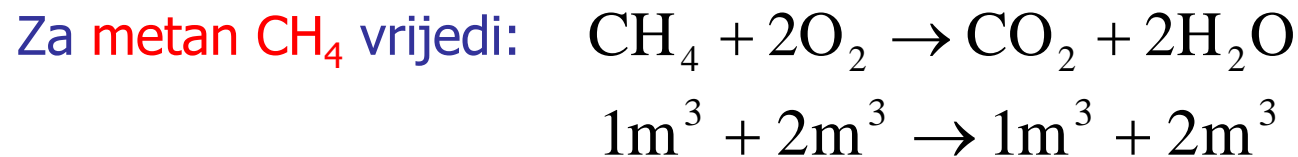
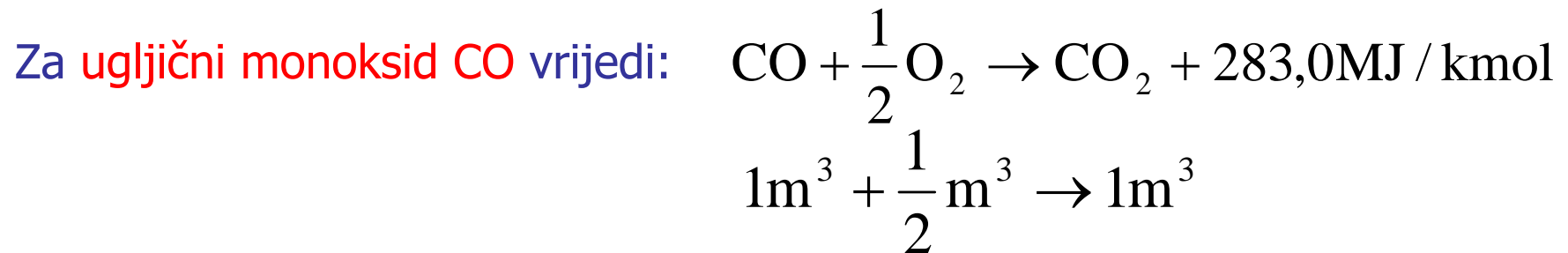
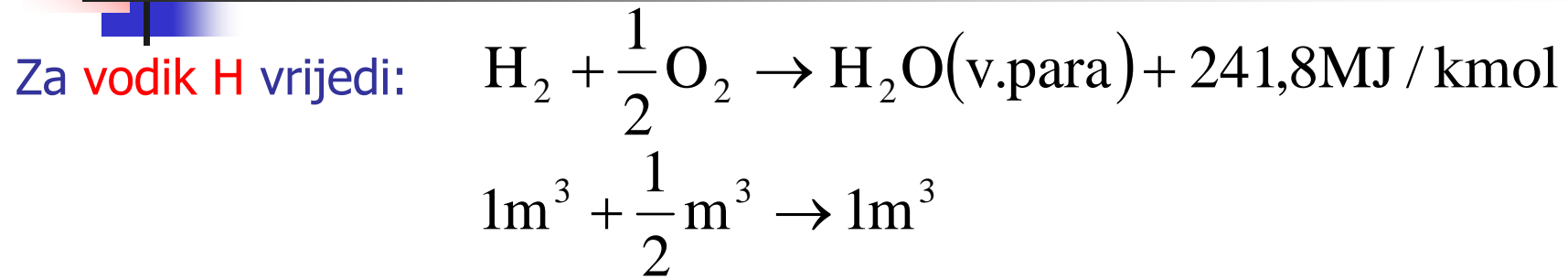
Za **sumpor S** vrijedi: $1\text{kmolS} + 1\text{kmolO}_2 \rightarrow 1\text{kmolSO}_2 + 296,9\text{MJ} / \text{kmol}$

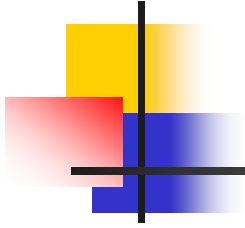


Svedeno na 1kg sumpora treba 1kg O₂ i dobiva se 2kg SO₂ odn.:

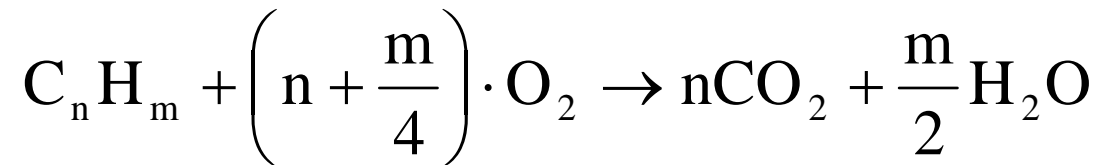


Stehiometrijski odnosi za pojedine sudionike prilikom izgaranja plinovitih goriva izgledaju ovako-vrijedi za potpuno izgaranje:





Za ugljikovodike C_nH_m vrijedi:



$$1m^3 + \left(n + \frac{m}{4}\right)m^3 \rightarrow nm^3 + \frac{m}{2}m^3$$

Gdje je n broj C atoma, a m broj H atoma.

Za izgaranje bilo kojeg goriva odnosno njegovog sastojka potreban je kisik.

za **kruta i tekuća** goriva minimalna količina kisika O_{\min} [kg/kg_{GORIVA}] je:

$$O_{\min} = \frac{8}{3}C + 8H + S - O$$

Obzirom da se kisik ne može u prirodi naći u slobodnom obliku, za izgaranje potreban zrak. Količina zraka G_{zrakmin} [kg_{zraka}/kg_{goriva}] je:

$$G_{\text{zrak min}} = 11,49 \cdot C + 34,48 \cdot H + 4,31 \cdot (S - O)$$

Obzirom da je zrak plin praktičnije je računati s volumenom zraka. Volumen zraka V_{zrakmin} [m³/kg_{goriva}] računa se prema izrazu:

$$V_{\text{zrak min}} = 8,88 \cdot C + 26,44 \cdot H + 3,33 \cdot (S - O)$$

za plinovita goriva minimalna količina zraka $V_{\text{zrak min}} [\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{GORIVA}}]$ je:

$$V_{\text{zrak min}} = 4,76 \cdot \left[0,5 \cdot (\text{H}_2 + \text{CO}) + 2\text{CH}_4 + \left(n + \frac{m}{4} \right) \cdot \text{C}_n\text{H}_m + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2 \right]$$

Udjeli pojedinih sastojaka su u $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ -decimalni broj, ne %!

Prethodni izrazi vrijede za potpuno izgaranje, što je teško postići, zbog toga gorivo izgara uz suvišak (pretičak) zraka λ .

Stvarna količina zraka je:

$$V_{\text{zrak}} = \lambda \cdot V_{\text{zrak min}}$$

Pretičak zraka λ o vrsti goriva i znosi od 1,05 do 1,35 za kruta goriva, i od 1,03 do 1,1 za plinovita i tekuća goriva.

Volumen dimnih plinova

Za **kruta i tekuća goriva** računa se prema sljedećim izrazima:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \cdot C \quad \text{m}^3 \text{CO}_2 / \text{kg}_{\text{GORIVA}}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,68 \cdot S \quad \text{m}^3 \text{SO}_2 / \text{kg}_{\text{GORIVA}}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,8 \cdot N + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{\text{zrak min}} \quad \text{m}^3 \text{N}_2 / \text{kg}_{\text{GORIVA}}$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{\text{zrak min}} \quad \text{m}^3 \text{O}_2 / \text{kg}_{\text{GORIVA}}$$

Zbrajanjem ovih veličina dobiva se **volumen suhih dimnih plinova**:

$$V_{\text{DPS}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad \text{m}^3 / \text{kg}_{\text{GORIVA}}$$



Tom volumenu treba pribrojiti volumen vodene pare:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,11 \cdot H + 1,24 \cdot W + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{\text{zrak min}} \quad \text{m}^3 \text{H}_2\text{O} / \text{kg}_{\text{GORIVA}}$$

gdje je d sadržaj vlage u zraku [kg/kg suhog zraka], $d=0,002$ (zima) do $0,009$ (ljetno) kg/kg.

Ukupni volumen dimnih plinova kada izgara kruto ili tekuće gorivo je:

$$V_{\text{DP}} = V_{\text{DPS}} + V_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{m}^3 / \text{kg}_{\text{GORIVA}}$$

Za **plinovita goriva** volumen dimnih plinova računa se prema sljedećim izrazima:

$$V_{\text{CO}_2} = \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + n \cdot \text{C}_n \text{H}_m \quad \left[\text{m}^3 \text{CO}_2 / \text{m}^3 \text{PLINA} \right]$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{\text{zrak min}} \quad \left[\text{m}^3 \text{N}_2 / \text{m}^3 \text{PLINA} \right]$$

$$V_{\text{N}_2} = \text{N}_2 + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{\text{zrak min}} \quad \left[\text{m}^3 \text{N}_2 / \text{m}^3 \text{PLINA} \right]$$

Zbrajanjem ovih veličina dobiva se **volumen suhih dimnih plinova**:

$$V_{\text{DPS}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \text{PLINA} \right]$$

Volumen vodene pare je:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + \frac{m}{2} \text{C}_n \text{H}_m + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{\text{zrak min}} \quad \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \text{PLINA} \right]$$

Ukupni volumen dimnih plinova kada izgara plinovito gorivo je:

$$V_{DP} = V_{DPS} + V_{H_2O} \quad \left[m^3 / m^3_{PLINA} \right]$$

Volumen pojedinih sastojak kao i ukupni volumen dimnih plinova može iskazati u kg/kg_{GORIVA} kg/m^3_{PLINA} uz poznate gustoće pojedinih sastojaka za normirane uvjete (jednadžba stanja idealnih plinova):

$$1m^3CO_2 = 1,96kgCO_2 / kg_{GORIVA} \quad 1m^3CO_2 = 1,96kgCO_2 / m^3_{PLINA}$$

$$1m^3N_2 = 1,25kgN_2 / kg_{GORIVA} \quad 1m^3N_2 = 1,25kgN_2 / m^3_{PLINA}$$

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

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

$$1m^3H_2O = 0,804kgH_2O / kg_{GORIVA} \quad 1m^3H_2O = 0,804kgH_2O / m^3_{PLINA}$$

Volumenski udjeli pojedinih sastojaka u ukupnom volumenu dimnih plinova računa se prema:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{DP}}$$

Gustoća dimnih plinova računa se prema - za normirane uvjete $p=101325\text{Pa}$, $T=273,15\text{K}$):

$$\rho_{DP} = \sum r_i \cdot \rho_i = 1,977 \cdot r_{\text{CO}_2} + 0,804 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}} + 2,931 \cdot r_{\text{SO}_2} + 1,257 \cdot r_{\text{N}_2} + 1,429 \cdot r_{\text{O}_2} + 1,25 \cdot r_{\text{CO}}$$

Specifična toplina dimnih plinova (pri $p=\text{konst.}$) računa se prema:

$$c_{pDP} = \sum g_i \cdot c_{pi} \quad [\text{kJ/kgK}]$$

g_i - maseni udjel pojedinog sastojka

c_{pi} – specifična toplina pojedinog sastojka



Entalpija dimnih plinova računa se prema:

$$h_{DP} = V_{DP} \cdot \rho_{DP} \cdot c_{pDP} \cdot t \quad \left[\text{kJ} / \text{kg}_{\text{GORIVA}} \right]$$

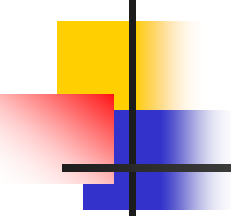
Napomena: V_{DP} se uvrštava u: $\left[\text{m}^3 / \text{m}^3_{\text{PLINA}} \right]$ za plinovita goriva

$\left[\text{m}^3 / \text{kg}_{\text{GORIVA}} \right]$ za kruta i tekuća goriva

Veličine iz prethodnog izraza ovisne su o temperaturi
(Tehnička termodinamika):

Veza između masenih i volumenskih udjela sastojaka dimnih plinova je:

$$g_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\rho_i \cdot V_i}{\rho \cdot V} = \frac{\rho_i}{\rho} \cdot r_i = \frac{M_i}{M} \cdot r_i$$



U prethodnom razmatranju u obzir su uzete reakcije koje nastupaju između gorivih elemenata i kisika (zraka) u procesu izgaranja. One su izvedene za stehiometrijske odnose, a volumeni pojedinih sastojaka dimnih plinova i ukupni volumen dimnih plinova dani su ovisnosti o vrijednosti pretička zraka.

Međutim sam proces izgaranja vrlo je složen proces s aspekta nastanka pojedinih sastojaka a posebno CO_2 i grupe NO_x spojeva. Zbog strogih propisa vezanih uz emisije pojedinih vrsta spojeva potrebno je vrlo precizno kontrolirati proces izgaranja s ciljem sniženjem emisija određenih spojeva, ali i optimalnog iskorištenja energenta.

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zavod za termodinamiku, strojarstvo i energetiku
Specifična emisija CO₂ – radi lakše usporedbe emisija različitih goriva i postrojenja

Uobičajeno je svesti emisiju CO₂ na jedinicu energije oslobođene u procesu izgaranja odn. na donju toplinsku vrijednost goriva:

$$g_{\text{CO}_2\text{d}} = \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2}}{H_d} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{MJ}} \right]$$


ili na jedinicu snage električne energije :

$$g_{\text{CO}_2\text{el}} = \frac{3,6 \cdot V_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2}}{H_d \cdot \eta} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}_{\text{el}}} \right]$$

$$V_{\text{CO}_2} \text{ se uvrštava u } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{GORIVA}}} \right] \quad \text{ili} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3_{\text{PLINA}}} \right]$$

η - stupanj iskorištenja postrojenja

Emisije iz nekih energetske objekata



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 postrojenje	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
Vjetroelektrana	do 3		0,02
Hidroelektrana	20		0,004

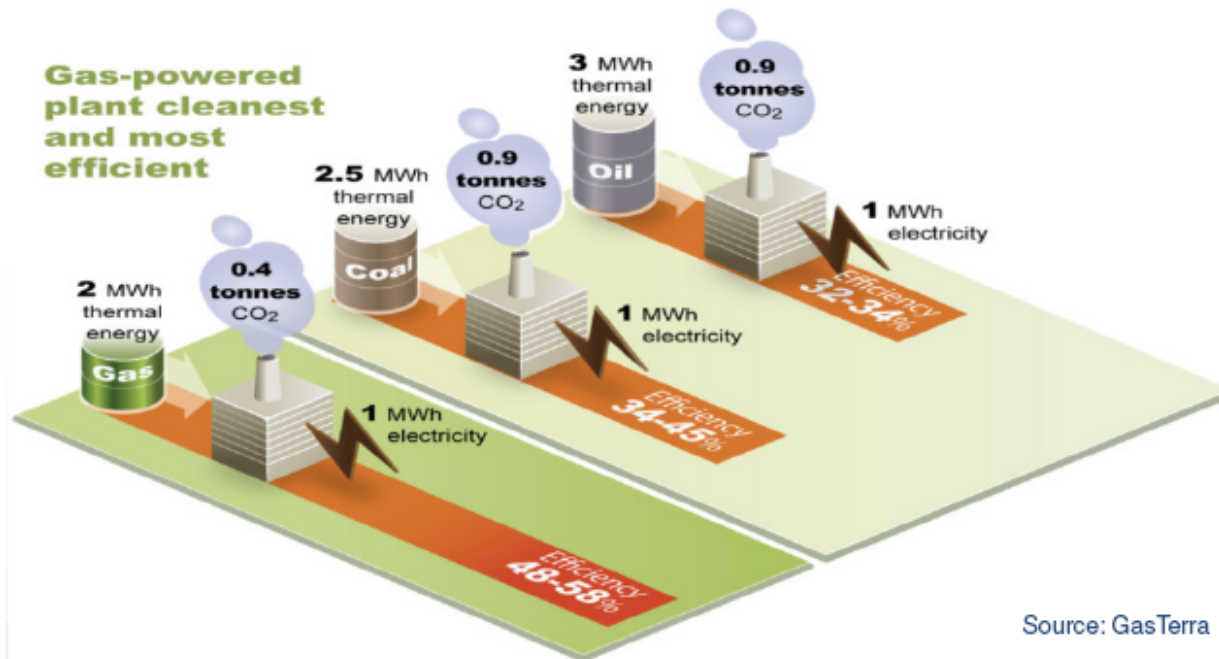
U iznose emisije ulaze emisije cjelokupnog životnog ciklusa određenog postrojenja – uključuju i energiju koja je bila potrebna da bi se komponente ili cijela postrojenja napravila



eurogas

Gas technology still offers 'big wins'—quickly—in making electricity

Gas-powered plant cleanest and most efficient

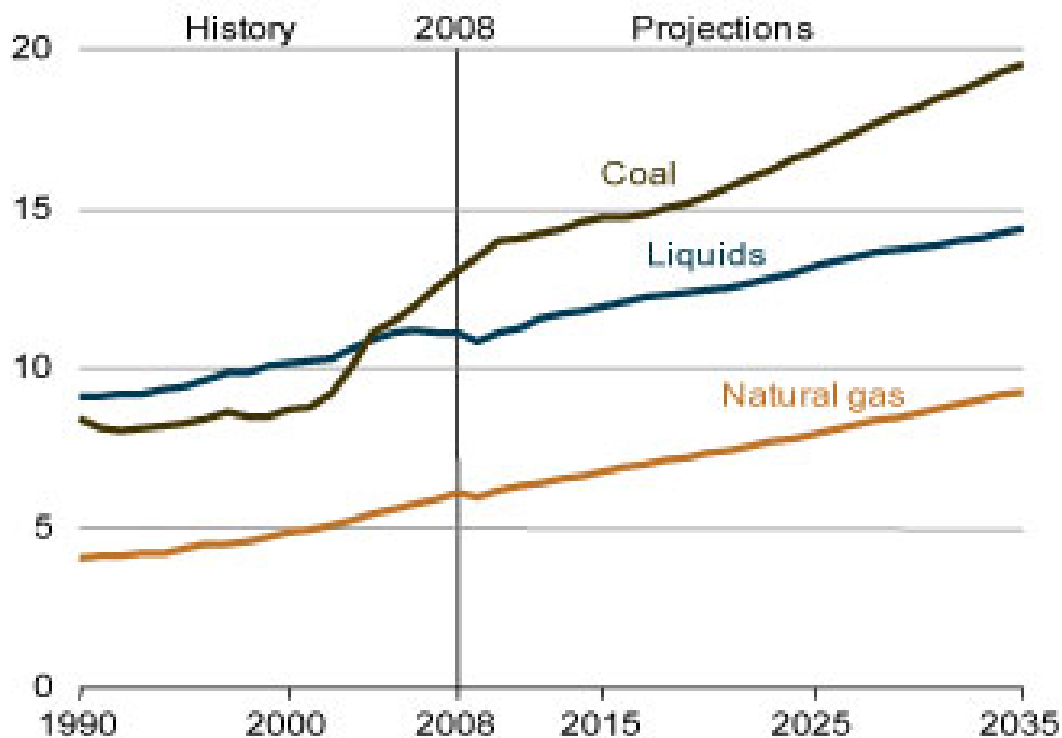


Source: GasTerra

Emisije CO₂ po vrstama goriva (izvor EIA)

Figure 111. World energy-related carbon dioxide emissions by fuel type, 1990-2035

(billion metric tons)



U praksi je moguće odrediti sastav dimnih plinova pa tako i udio CO_2 u ukupnim dimnim plinovima

maksimalni udio (računski) $\text{CO}_{2\text{max}}$ može se odrediti (izračunati) prema udjelu ugljika u gorivu i to za potpuno izgaranje ($\lambda=1$):

za kruta goriva i kapljevita goriva:

$$\text{CO}_{2\text{max}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{DP}}} = \frac{1,867 \cdot C}{V_{\text{DP}}} \quad \% \text{ vol}$$

za plinovita goriva:

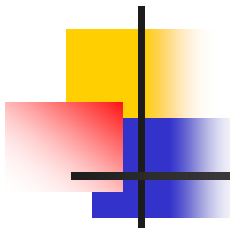
$$\text{CO}_{2\text{max}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{DP}}} = \frac{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + n \cdot \text{C}_n \text{H}_m}{V_{\text{DP}}} \quad \% \text{ vol}$$

Na osnovi izmjerene vrijednosti CO_2 i $\text{CO}_{2\text{max}}$ moguće je izračunati udio kisika u ukupnim dimnim plinovima:

$$\text{O}_2 = 21 \cdot \left(1 - \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_{2\text{max}}} \right)$$

Iz čega se može izračunati vrijednost pretička zraka :

$$\lambda = \frac{\text{CO}_{2\text{max}}}{\text{CO}_2} \qquad \lambda = \frac{21}{21 - \text{O}_2}$$



Karakteristične vrijednosti maksimalnih udjela $\text{CO}_{2\text{max}}$ za neke vrste goriva (ovisno o udjelu ugljika u gorivu)

Vrsta goriva	$\text{CO}_{2\text{max}}$, % volumena suhих dp
Kameni i smeđi ugljen	18,6-19,8
Koks	20,6
Lož ulje	15,5-16,0
Prirodni plin	12,5