

1. zadatak

Ugljen ima poznate udjele sljedećih sastojaka: C=75%, H=5%, O=3,5%, S=3%, N=0,8%. Također je poznat udio vodika u suhoj tvari H'=5,3%. Koliki su udjeli sumpora S, pepela A i vode W, te udjeli suhe tvari bez pepela (')?

Rješenje:

Sadržaj vodika H uzimajući u obzir sve sastojke i sadržaj vodika H' sveden na suhu tvar povezani su izrazom:

$$H' = \frac{H}{100 - W} \quad (1)$$

Uočimo da ovako zapisan izraz daje vrijednost H' kao decimalni broj, a ne postotak, bez obzira što se u razlomku na desnoj strani izraza nalaze postoci. Iz izraza (1) izračunat ćemo sadržaj vlage W [%], ali tako što ćemo za H' uvrstiti decimalni broj imajući u vidu prethodno objašnjenje.

$$W = 100 - \frac{H}{H'} = 100 - \frac{5}{0,053} = 5,66\% \quad (2)$$

Iz izraza koji uzima u obzir sve sastojke goriva:

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

možemo izračunati sadržaj pepela:

$$A = 100\% - (C + H + S + N + O + W) = 7,04\% \quad (4)$$

Konačno, udjeli pojedinih sastojaka svedeni na suhu tvar bez pepela mogu se izračunati na temelju poznatih udjela C, H, S, N i O pa je:

$$C'' = \frac{C}{100 - A - W} = 0,86 \quad (5)$$

$$H'' = \frac{H}{100 - A - W} = 0,057 \quad (6)$$

$$S'' = \frac{S}{100 - A - W} = 0,034 \quad (7)$$

$$O'' = \frac{O}{100 - A - W} = 0,04 \quad (8)$$

$$N'' = \frac{N}{100 - A - W} = 0,009 \quad (9)$$

Vrijednosti dobivene izrazima (5) do (9) moraju zbrojene dati 100%:

$$C'' + H'' + S'' + O'' + N'' = 100\% \quad (10)$$

## 2. zadatak

Za kameni ugljen poznatog sastava izračunajte donju i gornju toplinsku vrijednost (MJ/kg), te sastav dimnih plinova uz  $\lambda=1,12$ . Zadano je: C=80%, H=5%, O=7%, N=1,2%, S=0,8%, A=3%, W=3%, a sadržaj vlage u zraku je  $d=0,002\text{kg/kg}_{\text{suhog zraka}}$ . Udjele pojedinih sastojaka prikazite tablično kao volumne i masene udjele!

Rješenje:

Uvrštavanjem zadanih udjela pojedinih sastojaka kamenog ugljena i to kao decimalnih brojeva, a ne postotaka, u izraz za donju toplinsku vrijednost dobivamo njen iznos.

$$H_d = 34,8 \cdot C + 93,9 \cdot H + 10,46 \cdot S + 6,28 \cdot N - 10,8 \cdot O - 2,5 \cdot W = 34,8 \cdot 0,8 + 93,9 \cdot 0,05 +$$

$$10,46 \cdot 0,008 + 6,28 \cdot 0,012 - 10,8 \cdot 0,03 - 2,5 \cdot 0,03 = 32,295 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

Gornja toplinska vrijednost računa se prema izrazu:

$$H_g = H_d + 2,5 \cdot (9 \cdot H + W) = 32,295 + 2,5 \cdot (9 \cdot 0,05 + 0,03) = 33,495 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (2)$$

Minimalna količina zraka potrebnog za izgaranje računa se prema izrazu:

$$\begin{aligned} V_{\text{zrak min}} &= 8,88 \cdot C + 26,44 \cdot H + 3,33 \cdot (S - O) = \\ &= 88 \cdot 0,8 + 26,44 \cdot 0,05 + 3,33 \cdot (0,008 - 0,07) = 8,22 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \end{aligned} \quad (3)$$

Vrijednost minimalnog volumena zraka ukazuje na značajne potrebe zraka potrebne za izgaranje 1kg ugljena zadanog sastava što je važna činjenica za praktičnu izvedbu sustava izgaranja. Nužno je osigurati nesmetan dovod zraka za izgaranje u ložište što je pitanje sigurnosti rada trošila, a o ovoj temi bit će riječi u nastavku.

Sada je moguće izračunati volumene pojedinih sastojaka dimnih plinova; ugljičnog dioksida:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \cdot C = 1,867 \cdot 0,8 = 1,497 \frac{\text{m}^3_{\text{CO}_2}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \quad (4)$$

sumporovog dioksida:

$$V_{\text{SO}_2} = 0,68 \cdot S = 0,68 \cdot 0,008 = 0,00544 \frac{\text{m}^3_{\text{SO}_2}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \quad (5)$$

dušika:

$$V_{\text{N}_2} = 0,8 \cdot N + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{\text{zrak min}} = 0,8 \cdot 0,012 + 0,79 \cdot 1,12 \cdot 8,22 = 7,28 \frac{\text{m}^3_{\text{N}_2}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \quad (6)$$

Ovdje je važno uočiti da se izraz (6) sastoji od dva člana, prvi član posljedica je izgaranja dušika koji se nalazi u sastavu goriva, a drugi član dolazi iz zraka koji sudjeluje u izgaranju.

Usporedbom vrijednosti ta dva člana vidljivo je da je prvi član po svom iznosu za nekoliko redova veličine manji od drugog člana koji ujedno ovisi i o veličini pretička zraka  $\lambda$ . Nadalje volumen kisika, također ovisan o pretičku zraka  $\lambda$  je:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{zrak\ min} = 0,21 \cdot (1,12 - 1) \cdot 8,22 = 0,207 \frac{m^3_{O_2}}{kg_{goriva}} \quad (7)$$

Zbrajanjem sastojaka dimnih plinova izračunatih izrazima (4) do (7) dobiva se volumen suhih dimnih plinova:

$$V_{DPS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,497 + 0,00544 + 7,28 + 0,207 = 8,99 \frac{m^3}{kg_{goriva}} \quad (8)$$

Volumen vodene pare računa se prema:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 11,11 \cdot H + 1,24 \cdot W + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min} = \\ &= 11,11 \cdot 0,05 + 1,24 \cdot 0,03 + 1,6 \cdot 0,002 \cdot 1,12 \cdot 8,22 = 0,600 \frac{m^3_{H_2O}}{kg_{goriva}} \end{aligned} \quad (9)$$

Pribrajanjem volumena vodene pare volumenu suhих dimnih plinova dobiva se ukupni volumen dimnih plinova (volumen vlažnih dimnih plinova):

$$V_{DP} = V_{DPS} + V_{H_2O} = 8,99 + 0,622 = 9,612 \frac{m^3}{kg_{goriva}} \quad (10)$$

Sastav dimnih može se prikazati preko volumnih i masenih udjela. Volumni udjeli izračunati su na temelju vrijednosti dobivenih izrazima (4) do (10) prema izrazu:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{DP}} \quad (11)$$

i maseni udio:

$$g_i = \frac{\rho_i}{\rho_{DP}} \cdot r_i \quad (12)$$

Gustoću dimnih plinova  $\rho_{DP}$  izračunat ćemo prema:

$$\begin{aligned} \rho_{DP} &= \sum \rho_i \cdot r_i = 1,96 \cdot r_{CO_2} + 0,804 \cdot r_{H_2O} + 2,931 \cdot r_{SO_2} + 1,257 \cdot r_{N_2} + 1,429 \cdot r_{O_2} + 1,25 \cdot r_{CO} = \\ &= 1,96 \cdot 0,1557 + 0,804 \cdot 0,0624 + 2,931 \cdot 0,00057 + \\ &+ 1,257 \cdot 0,7574 + 1,429 \cdot 0,0215 = 1,3398 \frac{kg}{m^3} \end{aligned} \quad (13)$$

dok se gustoće pojedinih sastojaka nalaze redom u izrazu (13).

Rezultati su prikazani u sljedećoj tablici.

Sastojak	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	V <sub>DP</sub>
Volumen, m <sup>3</sup> /kg <sub>goriva</sub>	1,497	0,00544	7,28	0,207	0,600	9,612
Volumenski udio sastojka r <sub>i</sub>	0,1557	0,00057	0,7574	0,0215	0,0624	1
Maseni udio sastojka g <sub>i</sub>	0,229	0,00124	0,709	0,0664	0,0374	1

## 3. Zadatak

Prirodni plin sastava  $\text{CH}_4=94\%$  (metan),  $\text{C}_2\text{H}_2=3\%$  (acetilen),  $\text{CO}_2=3\%$  i  $\text{N}_2=1\%$  izgara uz pretičak zraka  $\lambda=1,1$ . Izračunajte donju i gornju toplinsku vrijednost ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ,  $\text{kWh}/\text{m}^3$ ) te sastav dimnih plinova. Sadržaj vlage u zraku zanemarite!

Rješenje:

Donju i gornju toplinsku vrijednost prirodnog plina računamo prema zadanim udjelima pojedinih sastojaka izraženim decimalnim brojem i podacima iz tablice 1. s predavanja korištenjem izraza:

$$H_d = \sum r_i \cdot H_{di} = 0,94 \cdot 35,93 + 0,03 \cdot 56,9 = 35,71 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \hat{=} 9,92 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (1)$$

$$H_g = \sum r_i \cdot H_{gi} = 0,94 \cdot 39,87 + 0,03 \cdot 58,9 = 39,59 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \hat{=} 11,00 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (2)$$

Minimalni volumen zraka za izgaranje izračunat ćemo prema izrazu:

$$\begin{aligned} V_{\text{zrak min}} &= 4,76 \cdot \left[ 0,5 \cdot (H_2 + \text{CO}) + 2\text{CH}_4 + \left( n + \frac{m}{4} \right) \cdot C_n H_m + 1,5H_2S - O_2 \right] = \\ &= 4,76 \cdot \left[ 2 \cdot 0,94 + \left( 2 + \frac{2}{4} \right) \cdot 0,03 \right] = 9,4486 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{ plina}} \end{aligned} \quad (3)$$

Također i ovdje uočimo vrlo značajnu količinu zraka potrebnog za izgaranje  $1\text{m}^3$  plina imajući na umu ono što je rečeno u prethodnom zadatku vezano uz sigurnost rada trošila.

Sada se mogu izračunati volumeni pojedinih sastojaka dimnih plinova; ugljičnog dioksida:

$$V_{\text{CO}_2} = \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + n \cdot C_n H_m = 0,03 + 0,94 + 2 \cdot 0,03 = 1,02 \frac{\text{m}^3_{\text{CO}_2}}{\text{m}^3 \text{ plina}} \quad (4)$$

dušika:

$$V_{\text{N}_2} = N_2 + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{\text{zrak min}} = 0,01 + 0,79 \cdot 1,1 \cdot 9,4486 = 8,22 \frac{\text{m}^3_{\text{N}_2}}{\text{m}^3 \text{ plina}} \quad (5)$$

i kisika:

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{\text{zrak min}} = 0,21 \cdot (1,1 - 1) \cdot 9,4486 = 0,198 \frac{\text{m}^3_{\text{O}_2}}{\text{m}^3 \text{ plina}} \quad (6)$$

Zbrajanjem volumena sastojaka (4) do (6) dobiva se volumen suhih dimnih plinova:

$$V_{\text{DPS}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = 1,02 + 8,221 + 0,192 = 9,433 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{ plina}} \quad (7)$$

Volumen vodene pare računa se prema:

$$V_{H_2O} = H_2 + 2CH_4 + \frac{m}{2} C_n H_m + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{zrak\ min} = 2 \cdot 0,94 + \frac{2}{2} \cdot 0,03 = 1,97 \frac{m^3_{H_2O}}{m^3_{plina}} \quad (8)$$

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

$$V_{DP} = V_{DPS} + V_{H_2O} = 9,433 + 1,97 = 11,41 \frac{m^3}{m^3_{plina}} \quad (9)$$

#### 4. zadatak

Za izgaranje plinovitog goriva tablično su zadani volumenski udjeli  $r_i$  pojedinih sastojaka dimnih plinova i volumen suhih dimnih plinova  $V_{DPS}=10,41$  ( $m^3/m^3_{PLINA}$ ). Koliki je volumen vlažnih dimnih plinova te volumen pojedinih sastojaka ( $m^3/m^3_{PLINA}$ )? Kolika je godišnja emisija  $CO_2$  (tona) ako se godišnja potroši  $V=25000m^3$  plina? Zadana je gustoća ugljičnog dioksida  $\rho_{CO_2}=1,96kg/m^3$ .

Sastojak	$CO_2$	$H_2O$	$N_2$	$O_2$
$r_i$	0,081	0,162	0,725	0,032

Rješenje:

Da bismo došli do volumena vodene pare sadržane u dimnim plinovima, koji nam je potreban za dobivanje ukupnog volumena dimnih plinova  $V_{DP}$ , poslužiti ćemo se zadanom vrijednosti  $r_{H_2O}$  iz tablice:

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{DP}} = 0,162 \quad \Rightarrow \quad V_{H_2O} = 0,162 \cdot V_{DP} \quad (1)$$

Nadalje je:

$$V_{DP} = V_{DPS} + V_{H_2O} \quad (2)$$

Pa uvrštavanjem (1) u (2) možemo izračunati ukupni volumen dimnih plinova:

$$V_{DP} = \frac{V_{DPS}}{1 - 0,162} = \frac{10,41}{1 - 0,162} = 12,42 \frac{m^3}{m^3_{plina}} \quad (3)$$

kada smo izračunali volumen dimnih plinova možemo korištenjem zadanih volumnih udjela izračunati volumene pojedinih sastojaka dimnih plinova;

ugljičnog dioksida:

$$V_{CO_2} = 0,081 \cdot V_{DP} = 1,002 \frac{m^3}{m^3_{plina}} \quad (4)$$

vodene pare:

$$V_{H_2O} = 0,162 \cdot V_{DP} = 2,01 \frac{m^3}{m_{plina}^3} \quad (5)$$

dušika:

$$V_{N_2} = 0,725 \cdot V_{DP} = 9,01 \frac{m^3}{m_{plina}^3} \quad (6)$$

kisika:

$$V_{O_2} = 0,032 \cdot V_{DP} = 0,40 \frac{m^3}{m_{plina}^3} \quad (7)$$

Godišnji volumen ugljičnog dioksida emitiranog u atmosferu izračunat ćemo na temelju jedinične emisije iz izraza (4) i zadane godišnje potrošnje prirodnog plina:

$$V_{CO_2, godišnje} = V_{CO_2} \cdot V_{plina} = 1,002 \frac{m^3}{m_{plina}^3} \cdot 25000 \frac{m_{plina}^3}{godina} = 25050 \frac{m_{CO_2}^3}{godina} \quad (8)$$

Obzirom da se u razmatranjima govori o emisijama ugljičnog dioksida u jedinici mase, konkretno tonama, prethodno izračunati volumen preračunat ćemo uz pomoć gustoće u godišnju emisiju ugljičnog dioksida u tonama:

$$G_{CO_2, godišnje} = V_{CO_2, godišnje} \cdot \rho_{CO_2} = 25050 \frac{m_{CO_2}^3}{godina} \cdot 1,96 \frac{kg}{m^3} = 49098 \frac{kg_{CO_2}}{godina} \quad (9)$$

## 5. zadatak

Usporedite emisije ugljičnog dioksida po jedinici donje toplinske vrijednosti i po jedinici proizvedene električne energije ako se kao energenti koriste ukapljeni naftni plin, prirodni plin i ugljen. Podaci su zadani tablično. Zadana je još i gustoća ugljičnog dioksida  $\rho_{CO_2} = 1,96 \text{ kg/m}^3$ . Napomena: donje toplinske vrijednosti približno su određene tamo gdje nije zadan sastav goriva dok je volumen ugljičnog dioksida izračunat prema odgovarajućim izrazima na temelju zadanog sastava goriva. Pretpostavljen je jednak stupanj iskorištenja termoenergetskog postrojenja za izgaranje sva tri goriva.

Energent	Sastav	Donja topl. vr. $H_d$	$V_{CO_2}$ (izračunato)	$\eta$
UNP (propan/butan)	35/65	113000 kJ/m <sup>3</sup>	3,65 m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> <sub>UNP</sub>	0,42
Prirodni plin	95% CH <sub>4</sub>	34000 kJ/m <sup>3</sup>	0,95 m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> <sub>PL</sub>	0,42
Ugljen	75% C	32000 kJ/kg	1,4 m <sup>3</sup> / kg <sub>G</sub>	0,42

Rješenje:

Svrha ovog zadatka je ukazati na važnu činjenicu da je prirodni plin ekološki najprihvatljivije fosilno gorivo. Zašto je to tako vidjet će se u nastavku.

Izrazi koji su nam potrebni da bismo izračunali tražene vrijednosti su za emisiju ugljičnog dioksida svedenu na jedinicu donje toplinske vrijednosti:

$$g_{CO_2,d} = \frac{V_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2}}{H_d} \left[ \frac{kg}{MJ} \right] \quad (1)$$

i za emisiju ugljičnog dioksida svedenu na jedinicu proizvedene električne energije:

$$g_{CO_2,el} = \frac{3,6 \cdot V_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2}}{H_d \cdot \eta} \left[ \frac{kg}{kWh_{el}} \right] \quad (2)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice sa zadanim podacima u izraze (1) i (2) dobivaju se emisije ugljičnog dioksida po jedinici donje toplinske vrijednosti odn. jedinici proizvedene električne energije, a rezultati su prikazani u tablici u nastavku.

Energent	Sastav	$g_{CO_2,d}$ , kg/MJ	$g_{CO_2,el}$ , kg/kWh <sub>el</sub>	$V_{CO_2}/H_d \cdot 10^{-5}$
UNP(propan/butan)	35/65	0,063	0,543	3,23
Prirodni plin	95%CH <sub>4</sub>	0,0547	0,469	2,79
Ugljen	75% C	0,0858	0,735	4,3

Rezultati obje veličine iskazuju isti trend jer je jedina razlika između izraza (1) i (2) u konstanti  $3,6/\eta$ . Praktično gledano interesantniji su rezultati dobiveni izu izraza (2) tj. emisija ugljičnog dioksida po jedinici proizvedene električne energije. Najmanja emisija kod korištenja prirodnog plina, a najveća kod korištenja ugljena dok se propan/butan nalazi između. Radi pojašnjenja uvedimo omjer  $V_{CO_2}/H_d$  čije su vrijednosti dane u istoj tablici.

Vidljivo je da porastom vrijednosti tog omjera raste i emisija ugljičnog dioksida. Razlog tome je da povećanje udjela ugljika u gorivu dovodi do porasta tog omjera jer rastu i brojnik i nazivnik što se lijepo vidi iz jednadžbe za računanje volumena ugljičnog dioksida u dimnim plinovima s jedne strane i jednadžbe za računanje donje toplinske vrijednosti s druge strane. Općenito vrijedi da goriva s većim udjelom ugljika daju i veći volumen ugljičnog dioksida u dimnim plinovima i viši iznos donje toplinske vrijednosti ali tako da istovremeno prethodno definirani omjer te dvije veličine raste. Primjenjujući ovo razmišljanje na ova tri energenta jasno je da je prirodni plin najbolje fosilno gorivo jer ima najmanji udio ugljika u svom sastavu a u korist vodika obzirom da je u njegovu sastavu dominira molekula metana CH<sub>4</sub> s preko 90% udjela. Na isti način ugljen je najlošiji jer upravo suprotno, u njegovu sastavu dominira ugljik. Stoga prirodni plin nazivamo ekološki najpovoljnijim fosilnim energentom iako prilikom izgaranja nastaje emisija ugljičnog dioksida, ali daleko manja nego kod korištenja drugih fosilnih goriva, a posebno ugljena.

## 6. zadatak

Zadana je donja toplinska vrijednost UNP-a  $H_d=31,82kWh/m^3$  nepoznatog omjera propana i butana. Izračunajte volumenske udjele propana, butana, dušika i kisika u smjesi nastaloj miješanjem UNP-a i zraka u omjeru UNP:zrak=2:1. Izračunajte sastojke dimnih plinova i

ukupni volumen dimnih plinova ako bi ta smjesa izgarala uz  $\lambda=1$ . Sadržaj vlage u zraku zanemarite!

Rješenje:

Prvo ćemo odrediti omjer propana i butana u UNP-u na temelju donje toplinske vrijednosti smjese uz korištenje tablica s predavanja (poglavlje Izgaranje):

$$H_d = \sum r_i \cdot H_{di} = r_P \cdot H_{dP} + r_B \cdot H_{dB} = 114,552 \frac{MJ}{m^3} \triangleq 31,82 \frac{kWh}{m^3} \quad (1)$$

Zbroj udjela propana i butana je:

$$r_P + r_B = 1 \quad (2)$$

odatle slijedi:

$$r_P = 1 - r_B \quad (2a)$$

pa uvrštavanjem (2a) u (1) dobivamo:

$$(1 - r_B) \cdot 93 + r_B \cdot 123,8 = 124,092 \frac{MJ}{m^3} \quad (3)$$

iz čega možemo izračunati volumni udio butana.

$$r_B = \frac{H_d - H_{dP}}{H_{dB} - H_{dP}} = \frac{114,552 - 93}{123,8 - 93} = 0,7 \quad (4)$$

i uvrštavanjem te vrijednosti u (2a) dobivamo i volumni udio propana.

$$r_P = 1 - r_B = 1 - 0,7 = 0,3 \quad (4a)$$

U nastavku se propan/butan upravo određenog međusobnog omjera miješa sa zrakom u omjeru UNP:zrak=2:1. takva smjesa naziva se još i miješani plin. U toj novoj smjesi udio UNP je:

$$r_{UNP} = \frac{2}{3} = 0,667 \quad (5)$$

a udio zraka je:

$$r_{ZRAK} = \frac{1}{3} = 0,333 \quad (6)$$

Miješanjem početne smjese propan/butan (0,3/0,7) sa zrakom dolazi do promjene udjela propana i butana tj. razrjeđenja u novonastaloj smjesi (miješanom plinu). Stoga je potrebno odrediti nove udjele propana, butana ali i kisika i dušika u novonastaloj smjesi a to se vrlo jednostavno radi uz pomoć izraza (5) i (6) dobivenih na temelju zadanog omjera UNP:zrak. Tako je novi udio propana:

$$r'_P = 0,667 \cdot r_P = 0,667 \cdot 0,3 = 0,2 \quad (7)$$

butana:

$$r'_B = 0,667 \cdot r_B = 0,667 \cdot 0,7 = 0,47 \quad (8)$$

kisika:

$$r'_{O_2} = 0,333 \cdot r_{O_2} = 0,333 \cdot 0,21 = 0,07 \quad (9)$$



i dušika:

$$r'_{N_2} = 0,333 \cdot r_{N_2} = 0,333 \cdot 0,79 = 0,26 \quad (10)$$

a njihov zbroj mora biti jednak 1 (jedan):

$$r'_P + r'_B + r'_{O_2} + r'_{N_2} = 1 \quad (11)$$

Minimalnu količinu zraka računamo prema poznatom izrazu, ali s novo izračunatim udjelima, jer će zrak koji se već nalazi u novonastaloj smjesi također sudjelovati u izgaranju. Minimalna količina zraka je:

$$\begin{aligned} V_{zrak \min} &= 4,76 \cdot \left[ 0,5 \cdot (H_2 + CO) + 2CH_4 + \left( n + \frac{m}{4} \right) \cdot C_nH_m + 1,5H_2S - O_2 \right] = \\ &= 4,76 \cdot \left[ \left( 3 + \frac{8}{4} \right) \cdot r'_P + \left( 3 + \frac{10}{4} \right) \cdot r'_B - r'_{O_2} \right] = \\ &= 4,76 \cdot \left[ \left( 3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 0,2 + \left( 3 + \frac{10}{4} \right) \cdot 0,47 - 0,07 \right] = 18,97 \frac{m^3}{m^3_{plina}} \end{aligned} \quad (12)$$

Volumene sastojaka računamo prema poznatim izrazima, ali također sa novo izračunatim udjelima sastojaka. Tako je volumen ugljičnog dioksida:

$$V_{CO_2} = CO_2 + CO + CH_4 + n \cdot C_nH_m = 3 \cdot r'_P + 4 \cdot r'_B = 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,47 = 2,48 \frac{m^3_{CO_2}}{m^3_{plina}} \quad (13)$$

dušika:

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot \lambda \cdot V_{zrak \min} = 0,26 + 0,79 \cdot 1 \cdot 18,97 = 15,25 \frac{m^3_{N_2}}{m^3_{plina}} \quad (14)$$

kisika.

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{zrak \min} = 0 \quad (15)$$

i vodene pare.

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= H_2 + 2CH_4 + \frac{m}{2} C_nH_m + 1,6 \cdot d \cdot \lambda \cdot V_{zrak \min} = \frac{8}{2} \cdot r'_P + \frac{10}{2} \cdot r'_B = \\ &= 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,47 = 3,15 \frac{m^3_{H_2O}}{m^3_{plina}} \end{aligned} \quad (16)$$

Ukupni volumen dimnih plinova je:

$$V_{DP} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O} = 2,48 + 15,25 + 3,15 = 20,88 \frac{m^3}{m^3_{plina}} \quad (17)$$

7. zadatak

Izračunajte gornji Wobbeov smjese plina sastava metana  $\text{CH}_4=65\%$ , propana  $\text{C}_3\text{H}_8=18\%$ , butana  $\text{C}_4\text{H}_{10}=5\%$  i  $\text{CO}_2=12\%$ . Zadana je gustoća zraka  $\rho_{\text{zr}}=1,293\text{kg/m}^3$ .

Rješenje:

Prvo ćemo izračunati gornju toplinsku vrijednost plina prema zadanim udjelima:

$$\begin{aligned} H_g &= \sum r_i \cdot H_{gi} = r_{\text{CH}_4} \cdot H_{g\text{CH}_4} + r_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot H_{g\text{C}_3\text{H}_8} + r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot H_{g\text{C}_4\text{H}_{10}} + r_{\text{CO}_2} \cdot H_{g\text{CO}_2} = \\ &= 0,65 \cdot 39,87 + 0,18 \cdot 101 + 0,05 \cdot 134 + 0,12 \cdot 0 = 50,80 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \end{aligned} \quad (1)$$

Gustoću plina izračunat ćemo prema:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{plina}} &= \sum r_i \cdot \rho_i = r_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} + r_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot \rho_{\text{C}_3\text{H}_8} + r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot \rho_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + r_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} = \\ &= 0,65 \cdot 0,71388 + 0,18 \cdot 1,963 + 2,587816 \cdot 0,05 + 0,12 \cdot 1,96 = 1,182 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned} \quad (2)$$

Relativna gustoća zraka je:

$$d = \frac{\rho_{\text{plina}}}{\rho_{\text{zraka}}} = \frac{1,182}{1,293} = 0,914 \quad (3)$$

Sada možemo izračunati gornji Wobbeov broj plina:

$$W_g = \frac{50,80}{\sqrt{0,914}} = 53,14 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \hat{=} 14,76 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (4)$$

8. zadatak

Termoenergetsko postrojenje električne snage  $P_{el}=28\text{MW}$  radeći 3500 sati proizvelo je emisiju od 47252,562 tone  $\text{CO}_2$ , a za pogon koristi prirodni plin nepoznatog udjela metana  $\text{CH}_4$  i propana  $\text{C}_3\text{H}_8$ , dok je udio  $\text{CO}_2=2,5\%$ . Izračunajte gornji Wobbeov broj prirodnog plina u  $\text{MJ/m}^3$  i  $\text{kWh/m}^3$  uz stupanj iskorištenja postrojenja  $\eta=42\%$  i poznatu donju toplinsku vrijednosti plina  $H_d=35,8878\text{MJ/m}^3$ . Zadano je:  $\lambda=1,05$ ,  $\rho_{\text{CO}_2}=1,96\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{zr}}=1,293\text{kg/m}^3$ .

Rješenje:

Prvo ćemo izračunati proizvedenu električnu energiju:

$$E_{el} = P_{el} \cdot \tau = 28 \cdot 10^3 \text{kW}_e \cdot 3500 \text{h} = 9,8 \cdot 10^7 \text{kWh}_e \quad (1)$$

Zadana emisija ugljičnog dioksida nastala je kao rezultat rada termoenergetskog postrojenja u navedenom vremenskom razdoblju tj. možemo je izračunati kao umnožak proizvedene električne energije i emisije ugljičnog dioksida svedene na jedinicu proizvedene električne energije:

$$EMISIJA = E_{el} \cdot g_{\text{CO}_2,el} \quad (2)$$

odavde je:

$$g_{CO_2,el} = \frac{EMISIJA}{E_{el}} = \frac{47252562kg}{9,8 \cdot 10^7 kWh_{el}} = 0,482169 \frac{kg}{kWh_{el}} \quad (3)$$

a iz izraza iz definicijskog izraza za  $g_{CO_2,el}$ :

$$V_{CO_2} = \frac{H_d \cdot \eta \cdot g_{CO_2,el}}{3,6 \cdot \rho_{CO_2}} = \frac{35,8878 \frac{MJ}{m^3} \cdot 0,42 \cdot 0,482169 \frac{kg}{kWh_{el}}}{3,6 \cdot 1,96 \frac{kg}{m^3}} = 1,03 \frac{m^3}{m^3_{plina}} \quad (4)$$

$$V_{CO_2} = CO_2 + CH_4 + 3 \cdot C_3H_8 = 0,025 + CH_4 + 3 \cdot C_3H_8 = 1,03 \frac{m^3}{m^3_{plina}} \quad (5)$$

$$H_d = CH_4 \cdot H_{dCH_4} + C_3H_8 \cdot H_{dC_3H_8} = CH_4 \cdot 35,93 + C_3H_8 \cdot 93 = 35,8878 \frac{MJ}{m^3} \quad (6)$$

Iz izraza (5) izrazimo udio metana uz supstituciju  $CH_4 \equiv r_M$  i  $C_3H_8 \equiv r_B$ :

$$r_M = 1,005 - 3 \cdot r_B \quad (5a)$$

(5a) uvršteno u (6) daje:

$$(1,005 - 3 \cdot r_p) \cdot 35,93 + r_p \cdot 93 = 35,8878 \quad (6a)$$

Iz (6a) možemo izračunati udio propana a onda iz (5a) udio metana:

$$r_p = 0,015 \hat{=} 1,5\% \text{ i } r_M = 0,96 \hat{=} 96\%.$$

Sada kada je poznat sastav plina možemo izračunati možemo izračunati gornji Wobbeov prema izrazu:

$$W_g = \frac{H_g}{\sqrt{d}} \quad \left[ \frac{MJ}{m^3}, \frac{kWh}{m^3} \right] \quad (7)$$

Gornja toplinska vrijednost plinske smjese je:

$$H_g = \sum r_i \cdot H_{gi} = r_M \cdot H_{gM} + r_p \cdot H_{gp} = 0,96 \cdot 39,87 + 0,015 \cdot 101 = 39,79 \frac{MJ}{m^3} \quad (8)$$

napomenimo samo da je oznaka za volumenski udio pojedinog sastojka plina  $r_i$  isto što i oznaka  $CH_4$ !

Sada još trebamo izračunati relativnu gustoću plina:

$$d = \frac{\rho_{plina}}{\rho_{zraka}} \quad (9)$$

gdje je:

$$\rho_{plina} = \sum r_i \cdot \rho_i = r_M \cdot \rho_M + r_p \cdot \rho_p + r_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} =$$

$$= 0,96 \cdot 0,71388 + 0,015 \cdot 1,963 + 0,025 \cdot 1,96 = 0,76377 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (10)$$

Relativna gustoća plina je prema (9) i (10):

$$d = \frac{0,76377}{1,293} = 0,5907 \quad (11)$$

Gornji Wobbeov broj plinovitog goriva je prema (7), (8) i (11):

$$W_g = \frac{39,79}{\sqrt{0,5907}} = 51,75 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \hat{=} 15,18 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

## 9. zadatak

Koliki je udio smjese propan/butan omjera 35/65 u miješanom plinu da bi se dobio gornji Wobbeov broj  $W_g=44\text{MJ/m}^3$ .

Rješenje:

Ovo predstavlja tipični problem kada je potrebno odrediti omjer propan/butana (UNP-a) i zraka kako bi se dobio miješani plin odgovarajućeg gornjeg Wobbeovog broja.

Polazni izrazi su:

$$W_g = \frac{H_g}{\sqrt{d}} = \frac{r_1 \cdot H_{g1} + r_2 \cdot H_{g2}}{\sqrt{r_1 \cdot d_1 + r_2 \cdot d_2}} \quad (1) \text{ i}$$

$$r_1 + r_2 = 1 \quad (2)$$

gdje indeks „1“ odgovara UNP-u, a indeks „2“ zraku. Uz činjenicu da je  $H_{g2}=0$  i  $d_2=1$  izraz (1) uz (2) prelazi u:

$$W_g = \frac{r_1 \cdot H_{g1}}{\sqrt{r_1 \cdot (d_1 - 1) + 1}} \quad (3)$$

Nepoznanicu  $r_1$  možemo izračunati rješavanjem kvadratne jednadžbe koja se dobije kvadriranjem i sređivanjem izraza (3):

$$r_1 = \left[ \left( \frac{W_g}{H_{g1}} \right)^2 \cdot \frac{d_1 - 1}{2} \right] \pm \sqrt{\left[ \left( \frac{W_g}{H_{g1}} \right)^2 \cdot \frac{d_1 - 1}{2} \right]^2 + \left( \frac{W_g}{H_{g1}} \right)^2} \quad (4)$$

Izračunajmo sada gornju toplinsku vrijednost propan/butana omjera 35/65:

$$H_{g1} = \sum r_i \cdot H_{gi} = r_P \cdot H_{gP} + r_B \cdot H_{gB} = 0,35 \cdot 101 + 0,65 \cdot 134 = 122,45 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \quad (5)$$

i relativnu gustoću:

$$d = \frac{\rho_{UNP}}{\rho_{zraka}} = \frac{\sum r_i \cdot \rho_i}{\rho_{zraka}} = \frac{r_P \cdot \rho_P + r_B \cdot \rho_B}{\rho_{zraka}} = \frac{0,35 \cdot 2,011 + 0,65 \cdot 2,708}{1,293} = 1,906 \quad (6)$$

pa uvrštavanjem vrijednosti (5) i (6) dobivamo:

$$r_1 = \left[ \left( \frac{44}{122,45} \right)^2 \cdot \frac{1,906 - 1}{2} \right] \pm \sqrt{\left[ \left( \frac{44}{122,45} \right)^2 \cdot \frac{1,906 - 1}{2} \right]^2 + \left( \frac{44}{122,45} \right)^2} = 0,05849 \pm 0,36406$$

pa je:

$$r_{1_1} = 0,4226 \text{ i } r_{1_2} = -0,31 < 0$$

Odabiremo pozitivno rješenje pa je udio UNP u smjesi:

$$r_1 = 0,4226 \hat{=} 42,26\%$$

a udio zraka je prema (2):

$$r_2 = 1 - r_1 = 1 - 0,4226 = 0,5774 \hat{=} 57,74\% .$$

Prema tome miješani plin koji se sastoji od 42,26% propan butana (UNP-a) omjera 35/65 i 57,74% zraka ima zadanu vrijednost gornjeg Wobbeovog broja.

Prilog. Tablica sa svojstvima nekih plinova.

Sastojak-plin	Formula	Hd, MJ/m <sup>3</sup>	Hg, MJ/m <sup>3</sup>	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	R, kJ/kgK
Vodik	H <sub>2</sub>	10,81	12,78	0,089949	4124
Ugljični monoksid	CO	12,64	12,64	1,249411	296,9
Metan	CH <sub>4</sub>	35,93	39,87	0,71388	519,625
Acetilen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	56,9	58,9	1,160055	319,7692
Etilen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	59,55	63,5	1,24929	296,9286
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	64,5	70,45	1,338525	277,1333
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	93	101	2,011	188,9545
Butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	123,8	134	2,708	143,3448
Benzol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	144	150,3	3,480166	106,5897
Sumporovodik	H <sub>2</sub> S	28,14	30,3	0,803115	461,8889