

Priprema za 1. kolokvijum:

## **RAČUNSKI ZADACI IZ OBLASTI SAGOREVANJA**

### **Lista oznaka:**

$A$	-maseni udeo mineralnih primesa u gorivu, %
$C$	-maseni udeo ugljenika u gorivu, %
$C_mH_n$	-udeo ugljovodonika opšteg oblika, sa $m$ atoma ugljenika i $n$ atoma vodonika, u gorivu, %
$C_mH_nO_o$	-udeo jedinjenja čiji molekul ima $m$ atoma ugljenika, $n$ atoma vodonika i $o$ atoma kiseonika u gorivu, %
$CO$	-udeo ugljen-monoksida u gorivu, %
$CO_2$	-udeo ugljen-dioksida u gorivu ili produktima sagorevanja, %
$g$	-maseni udeo u gorivu, - ili kg/kg; indeksi koji su identični sa oznakama hemijskih elemenata ili jedinjenja označavaju masene udele odgovarajućih elemenata ili jedinjenja u gorivu; moguća je i upotreba indeksa radi označavanja uslovne mase (videti značenja nekih indeksa)
$H$	-maseni udeo vodonika u gorivu, %
$H_2$	-udeo vodonika u gorivu, %
$H_2O$	-udeo vode ili vodene pare u gorivu ili produktima sagorevanja, %
$H_d$	-donja toplotna moć goriva, kJ/kg
$H_g$	-gornja toplotna moć goriva, kJ/kg
$L_{min}$	-minimalna teorijski potrebna količina vazduha za potpuno sagorevanje goriva, kmol/kmol, kg/kg, kg/m <sup>3</sup> , m <sup>3</sup> /kg i m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$L_S$	-stvarna količina vazduha za sagorevanje goriva, kmol/kmol, kg/kg, kg/m <sup>3</sup> , m <sup>3</sup> /kg i m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$m$	-masa, kg; indeks $G$ uz ovu oznaku pokazuje da je reč o masi goriva, a indeksi koji su identični sa oznakama hemijskih elemenata ili jedinjenja označavaju mase odgovarajućih elemenata ili jedinjenja
$M$	-molarna masa, kg/kmol; indeksi koji su identični sa oznakama hemijskih elemenata ili jedinjenja označavaju molarne mase odgovarajućih elemenata ili jedinjenja
$n$	-količina materije, kmol; indeksi koji su identični sa oznakama hemijskih elemenata ili jedinjenja označavaju količine materije odgovarajućih elemenata ili jedinjenja
$N$	-maseni udeo azota u gorivu, %
$N_2$	-udeo azota u gorivu ili produktima sagorevanja, %
$O$	-maseni udeo kiseonika u gorivu, %
$O_2$	-udeo kiseonika u gorivu ili produktima sagorevanja, %
$O_{min}$	-minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje goriva, kmol/kmol, kg/kg, kg/m <sup>3</sup> , m <sup>3</sup> /kg i m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$O_S$	-stvarna količina kiseonika za sagorevanje goriva, kmol/kmol, kg/kg, kg/m <sup>3</sup> , m <sup>3</sup> /kg i m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$Q$	-količina toplote nastala sagorevanjem, kJ
$r$	-zapreminski udeo u gorivu, - ili m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ; indeksi koji su identični sa oznakama hemijskih jedinjenja označavaju zapreminske udele odgovarajućih jedinjenja u gorivu
$S$	-maseni udeo sumpora u gorivu, %
$V$	-zapremina, m <sup>3</sup> , indeks $G$ uz ovu oznaku pokazuje da je reč o zapremini goriva, a indeksi koji su identični sa oznakama hemijskih elemenata ili jedinjenja označavaju zapreminu odgovarajućih elemenata ili jedinjenja
$V_m$	-molarna zapremina, m <sup>3</sup> /kmol, na normalnim uslovima (pritisak 1,0133bar i temperatura 0°C) za gasove iznosi 22,4m <sup>3</sup> /kmol
$W_G$	-maseni udeo grube vlage u radnoj masi goriva, %
$W_H$	-maseni udeo higroskopne vlage u gorivu, %
$x$	-nepoznata količina materije, kmol
$y$	-nepoznata količina materije, kmol
$z$	-nepoznata količina materije, kmol

$\lambda$  -koeficijent viška vazduha  
 $\varphi$  -odnos masenih udela istog elementa u dve uslovne mase goriva; prvi indeks (videti značenja nekih indeksa) označava uslovnu masu sa koje se vrši preračunavanje, a drugi uslovnu masu na koju se vrši preračunavanje

**Značenja nekih indeksa:**

- (*a*) -analitička masa goriva
- (*g*) -goriva masa goriva
- (*mas*) -maseni udeo
- (*o*) -organska masa goriva
- (*r*) -radna masa goriva
- (*vol*) -zapreminski udeo

## 1. Sagorevanje čvrstih goriva

### Zadatak 1.

Na osnovu elementarne analize analitičke mase jedne vrste uglja:  $C_{(a)}=56,4\%$ ;  $H_{(a)}=6,8\%$ ;  $O_{(a)}=5,2\%$ ;  $N_{(a)}=1,5\%$ ;  $S_{(a)}=6,6\%$ ;  $A_{(a)}=9,4\%$  i  $W_{H(a)}=14,1\%$ , odrediti gornju i donju toplotnu moć analitičke mase.

### Rešenje:

Gornju toplotnu moć analitičke mase uglja moguće je približno odrediti na osnovu poznatog elementarnog sastava primenom formule:

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

Prema tome, gornja toplotna moć iznosi:

$$H_{g(a)} = 340 \cdot 56,4 + 1420 \cdot \left( 6,8 - \frac{5,2}{8} \right) + 93 \cdot 6,6,$$

$$H_{g(a)} = 28522,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 28,52 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}.$$

Donju toplotnu moć analitičke mase moguće je približno odrediti sličnom formulom, takođe na osnovu elementarne analize:

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

Odatle je:

$$H_{d(a)} = 340 \cdot 56,4 + 1190 \cdot \left( 6,8 - \frac{5,2}{8} \right) + 93 \cdot 6,6 - 25 \cdot 14,1,$$

$$H_{d(a)} = 26755,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 26,76 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}.$$

Donju toplotnu moć, takođe je moguće odrediti na osnovu poznate gornje toplotne moći goriva, primenom opšte jednačine veze između gornje i donje toplotne moći. Za analitičku masu goriva, ova jednačina ima oblik:

$$H_{d(a)} = H_{g(a)} - 25 \cdot (9 \cdot H_{(a)} + W_{H(a)}).$$

Na osnovu ove jednačine dalje imamo:

$$H_{d(a)} = 28522,8 - 25 \cdot (9 \cdot 6,8 + 14,1),$$

$$H_{d(a)} = 26640,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 26,64 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}.$$

Iako se vrednosti donje toplotne moći dobijene na dva prikazana načina malo razlikuju, oba rezultata su prihvatljiva i smatraju se dovoljno tačnim.

### Zadatak 2.

Data je elementarna analiza radne mase jednog uzorka uglja:  $C_{(r)}=42,8\%$ ;  $H_{(r)}=12\%$ ;  $O_{(r)}=5\%$ ;  $N_{(r)}=0,5\%$ ;  $S_{(r)}=3,8\%$ ;  $A_{(r)}=15\%$ ;  $W_{H(r)}=11,9\%$  i  $W_G=9\%$ . Potrebno je odrediti elementarni sastav gorive mase ovog goriva.

### Rešenje:

Maseni udeo ugljenika u radnoj masi uglja, izražen u procentima, jednak je:

$$C_{(r)} = \frac{m_C}{m_{G(r)}} \cdot 100,$$

gde je:

$$m_{G(r)} = m_C + m_H + m_O + m_N + m_S + m_A + m_{WH} + m_{WG}.$$

Slično tome, maseni udeo ugljenika u gorivoj masi uglja je:

$$C_{(g)} = \frac{m_C}{m_{G(g)}} \cdot 100,$$

gde je:

$$m_{G(g)} = m_C + m_H + m_O + m_N + m_S = m_{G(r)} - m_A - m_{WH} - m_{WG}.$$

Maseni udeo ugljenika u gorivoj masi uglja, imajući u vidu prethodne dve jednačine, može se izraziti kao:

$$C_{(g)} = \frac{m_C}{m_{G(r)} - m_A - m_{WH} - m_{WG}} \cdot 100.$$

Odnos masenih udela ugljenika u gorivoj i radnoj masi je:

$$\Phi_{(r),(g)} = \frac{C_{(g)}}{C_{(r)}} = \frac{\frac{m_C}{m_{G(r)} - m_A - m_{WH} - m_{WG}} \cdot 100}{\frac{m_C}{m_{G(r)}} \cdot 100},$$

odnosno:

$$\Phi_{(r),(g)} = \frac{100}{\frac{m_{G(r)} - m_A - m_{WH} - m_{WG}}{m_{G(r)}} \cdot 100},$$

$$\Phi_{(r),(g)} = \frac{100}{100 - \left( \frac{m_A}{m_{G(r)}} \cdot 100 + \frac{m_{WH}}{m_{G(r)}} \cdot 100 + \frac{m_{WG}}{m_{G(r)}} \cdot 100 \right)}.$$

Imajući u vidu da je:

$$\frac{m_A}{m_{G(r)}} \cdot 100 = A_{(r)}, \quad \frac{m_{WH}}{m_{G(r)}} \cdot 100 = W_{H(r)} \quad \text{i} \quad \frac{m_{WG}}{m_{G(r)}} \cdot 100 = W_G,$$

može se odrediti odnos masenih udela ugljenika u gorivoj i radnoj masi kao:

$$\Phi_{(r),(g)} = \frac{100}{100 - (A_{(r)} + W_{H(r)} + W_G)}.$$

Konačno, maseni udeo ugljenika u gorivoj masi uglja se može odrediti iz relacije:

$$C_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot C_{(r)}.$$

Ako se sprovede identična analiza za masene udele vodonika, kiseonika, azota i sumpora u gorivoj masi, dobijaju se relacije istog tipa:

$$H_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot H_{(r)}, \quad O_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot O_{(r)}, \quad N_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot N_{(r)} \quad \text{i} \quad S_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot S_{(r)},$$

gde je:

$\Phi_{(r),(g)}$  -odnos masenih udela svakog od elemenata u gorivoj i radnoj masi goriva:

$$\Phi_{(r),(g)} = \frac{C_{(g)}}{C_{(r)}} = \frac{H_{(g)}}{H_{(r)}} = \frac{O_{(g)}}{O_{(r)}} = \frac{N_{(g)}}{N_{(r)}} = \frac{S_{(g)}}{S_{(r)}} = \frac{100}{100 - (A_{(r)} + W_{H(r)} + W_G)}$$

Prema tome, na osnovu zadatih podataka se može najpre odrediti vrednost  $\Phi_{(r),(g)}$ :

$$\Phi_{(r),(g)} = \frac{100}{100 - (A_{(r)} + W_{H(r)} + W_G)}$$

$$\Phi_{(r),(g)} = \frac{100}{100 - (9 + 11,9 + 15)}$$

$$\Phi_{(r),(g)} = 1,56$$

Zatim se određuje elementarni sastav gorive mase uglja:

$$C_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot C_{(r)}, \quad C_{(g)} = 1,56 \cdot 42,8, \quad C_{(g)} = 66,77\%$$

$$H_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot H_{(r)}, \quad H_{(g)} = 1,56 \cdot 12, \quad H_{(g)} = 18,72\%$$

$$O_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot O_{(r)}, \quad O_{(g)} = 1,56 \cdot 5, \quad O_{(g)} = 7,8\%$$

$$N_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot N_{(r)}, \quad N_{(g)} = 1,56 \cdot 0,5, \quad N_{(g)} = 0,78\%$$

$$S_{(g)} = \Phi_{(r),(g)} \cdot S_{(r)}, \quad S_{(g)} = 1,56 \cdot 3,8, \quad S_{(g)} = 5,93\%$$

Ovakav pristup se koristi i kada se traži preračunavanje bilo koje dve uslovne mase goriva. Razlikuju se samo odnosi  $\Phi$ .

### Zadatak 3.

Na osnovu elementarne analize analitičke mase jedne vrste uglja:  $C_{(a)}=48,4\%$ ;  $H_{(a)}=6,8\%$ ;  $O_{(a)}=9,2\%$ ;  $N_{(a)}=1,5\%$ ;  $S_{(a)}=6,6\%$ ;  $A_{(a)}=9,5\%$  i  $W_{H(a)}=18\%$ , odrediti:

- gornju i donju toplotnu moć analitičke mase goriva,
- elementarni sastav gorive mase goriva i
- gornju toplotnu moć gorive mase goriva.

#### Rešenje:

- Gornja i donja toplotna moć analitičke mase goriva određuju se kao:

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

$$H_{g(a)} = 340 \cdot 48,4 + 1420 \cdot \left( 6,8 - \frac{9,2}{8} \right) + 93 \cdot 6,6,$$

$$H_{g(a)} = 25092,8 \frac{kJ}{kg} = 25,09 \frac{MJ}{kg} \text{ i}$$

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

$$H_{d(a)} = 340 \cdot 48,4 + 1190 \cdot \left( 6,8 - \frac{9,2}{8} \right) + 93 \cdot 6,6 - 25 \cdot 18,$$

$$H_{d(a)} = 23343,3 \frac{kJ}{kg} = 23,34 \frac{MJ}{kg}$$

- Da bi se odredio elementarni sastav gorive mase, potrebno je najpre odrediti odnos masenih udela svakog od elemenata u gorivoj i analitičkoj masi goriva. Analitička i goriva masa se mogu predstaviti jednačinama:

$$m_{G(a)} = m_C + m_H + m_O + m_N + m_S + m_A + m_{WH} \text{ i}$$

$$m_{G(g)} = m_C + m_H + m_O + m_N + m_S = m_{G(a)} - m_A - m_{WH} .$$

Sada se može dobiti traženi odnos masenih udela (na primeru ugljenika):

$$\Phi_{(a),(g)} = \frac{C_{(g)}}{C_{(a)}} = \frac{\frac{m_C}{m_{G(g)}} \cdot 100}{\frac{m_C}{m_{G(a)}} \cdot 100} = \frac{\frac{m_C}{m_{G(a)} - m_A - m_{WH}} \cdot 100}{\frac{m_C}{m_{G(a)}} \cdot 100} ,$$

$$\Phi_{(a),(g)} = \frac{100}{\frac{m_{G(a)} - m_A - m_{WH}}{m_{G(a)}} \cdot 100} = \frac{100}{100 - \left( \frac{m_A}{m_{G(a)}} \cdot 100 + \frac{m_{WH}}{m_{G(a)}} \cdot 100 \right)} ,$$

$$\Phi_{(a),(g)} = \frac{100}{100 - (A_{(a)} + W_{H(a)})} .$$

Na osnovu zadatih podataka je:

$$\Phi_{(a),(g)} = \frac{100}{100 - (18 + 9,5)} ,$$

$$\Phi_{(a),(g)} = 1,38 .$$

Elementarni sastav gorive mase uglja će biti:

$$C_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot C_{(a)} , \quad C_{(g)} = 1,38 \cdot 48,4 , \quad C_{(g)} = 66,79\% ,$$

$$H_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot H_{(a)} , \quad H_{(g)} = 1,38 \cdot 6,8 , \quad H_{(g)} = 9,38\% ,$$

$$O_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot O_{(a)} , \quad O_{(g)} = 1,38 \cdot 9,2 , \quad O_{(g)} = 12,69\% ,$$

$$N_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot N_{(a)} , \quad N_{(g)} = 1,38 \cdot 1,5 , \quad N_{(g)} = 2,07\% \text{ i}$$

$$S_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot S_{(a)} , \quad S_{(g)} = 1,38 \cdot 6,6 , \quad S_{(g)} = 9,11\% .$$

(c) Gornja toplotna moć gorive mase goriva može se dobiti pomoću poznatog elementarnog sastava, iz formule:

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

$$H_{g(g)} = 340 \cdot 66,79 + 1420 \cdot \left( 9,38 - \frac{12,69}{8} \right) + 93 \cdot 9,11 ,$$

$$H_{g(g)} = 34622,7 \frac{kJ}{kg} = 34,62 \frac{MJ}{kg} .$$

Gornju toplotnu moć gorive mase takođe je moguće dobiti koristeći poznatu gornju toplotnu moć analitičke mase goriva. Ponovo ćemo poći od formule:

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

Imajući u vidu da je:

$$C_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot C_{(a)} , \quad H_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot H_{(a)} , \quad O_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot O_{(a)} \text{ i } S_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot S_{(a)} ,$$

možemo napisati izraz za gornju toplotnu moć gorive mase kao:

$$H_{g(g)} = 340 \cdot \varphi_{(a),(g)} \cdot C_{(a)} + 1420 \cdot (\varphi_{(a),(g)} \cdot H_{(a)} - \frac{\varphi_{(a),(g)} \cdot O_{(a)}}{8}) + 93 \cdot \varphi_{(a),(g)} \cdot S_{(a)},$$

$$H_{g(g)} = \varphi_{(a),(g)} \cdot (340 \cdot C_{(a)} + 1420 \cdot (H_{(a)} - \frac{O_{(a)}}{8}) + 93 \cdot S_{(a)}),$$

pa je konačno:

$$H_{g(g)} = \varphi_{(a),(g)} \cdot H_{g(a)} = \frac{100}{100 - (A_{(a)} + W_{H(a)})} \cdot H_{g(a)}.$$

Zamenom zadatih i izračunatih vrednosti se dobija:

$$H_{g(g)} = 1,38 \cdot 25092,8,$$

$$H_{g(g)} = 34628,1 \frac{kJ}{kg} = 34,63 \frac{MJ}{kg}.$$

Vrednosti gornje toplotne moći gorive mase dobijene na oba načina, iako se malo razlikuju, smatraju se dovoljno tačnim.

#### Zadatak 4.

Za poznato čvrsto gorivo sa karakteristikama:  $H_{g(a)}=22\text{MJ/kg}$ ;  $W_{H(a)}=15\%$ ;  $W_G=5\%$  i  $H_{(a)}=5\%$ , potrebno je odrediti donju toplotnu moć analitičke mase kao i gornju i donju toplotnu moć radne mase ovog goriva.

#### Rešenje:

Donju toplotnu moć analitičke mase goriva treba odrediti na osnovu poznate gornje toplotne moći, primenom opšte jednačine veze između gornje i donje toplotne moći:

$$H_{d(a)} = H_{g(a)} - 25 \cdot (9 \cdot H_{(a)} + W_{H(a)}).$$

Odatle je:

$$H_{d(a)} = 22000 - 25 \cdot (9 \cdot 5 + 15),$$

$$H_{d(a)} = 20500 \frac{kJ}{kg} = 20,5 \frac{MJ}{kg}.$$

Gornja i donja toplotna moć radne mase goriva dobijaju se iz poznatih toplotnih moći analitičke mase. Najpre je potrebno naći  $\varphi_{(a),(r)}$ . Radna i analitička masa goriva su:

$$m_{G(r)} = m_C + m_H + m_O + m_N + m_S + m_A + m_{WH} + m_{WG} \text{ i}$$

$$m_{G(a)} = m_C + m_H + m_O + m_N + m_S + m_A + m_{WH} = m_{G(r)} - m_{WG}.$$

Dalje je:

$$\varphi_{(a),(r)} = \frac{C_{(r)}}{C_{(a)}} = \frac{\frac{m_C}{m_{G(r)}} \cdot 100}{\frac{m_C}{m_{G(a)}} \cdot 100} = \frac{\frac{m_C}{m_{G(r)}} \cdot 100}{\frac{m_C}{m_{G(r)} - m_{WG}} \cdot 100},$$

$$\varphi_{(a),(r)} = \frac{\frac{m_{G(r)} - m_{WG}}{m_{G(r)}} \cdot 100}{100} = \frac{100 - \frac{m_{WG}}{m_{G(r)}} \cdot 100}{100},$$

$$\varphi_{(a),(r)} = \frac{100 - W_G}{100}.$$

Jednačina za gornju toplotnu moć radne mase:

$$H_{g(r)} = 340 \cdot C_{(r)} + 1420 \cdot (H_{(r)} - \frac{O_{(r)}}{8}) + 93 \cdot S_{(r)},$$

imajući u vidu relacije:

$$C_{(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot C_{(a)}, \quad H_{(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot H_{(a)}, \quad O_{(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot O_{(a)} \quad \text{i} \quad S_{(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot S_{(a)},$$

postaje:

$$H_{g(r)} = 340 \cdot \Phi_{(a),(r)} \cdot C_{(a)} + 1420 \cdot (\Phi_{(a),(r)} \cdot H_{(a)} - \frac{\Phi_{(a),(r)} \cdot O_{(a)}}{8}) + 93 \cdot \Phi_{(a),(r)} \cdot S_{(a)},$$

$$H_{g(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot (340 \cdot C_{(a)} + 1420 \cdot (H_{(a)} - \frac{O_{(a)}}{8}) + 93 \cdot S_{(a)}),$$

$$H_{g(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot H_{g(a)} = \frac{100 - W_G}{100} \cdot H_{g(a)}.$$

Zamenom zadatih i izračunatih vrednosti, dobija se:

$$\Phi_{(a),(r)} = \frac{100 - 5}{100},$$

$$\Phi_{(a),(r)} = 0,95 \quad \text{i}$$

$$H_{g(r)} = 0,95 \cdot 22000,$$

$$H_{g(r)} = 20900 \frac{kJ}{kg} = 20,9 \frac{MJ}{kg}.$$

Slično tome, znajući da važi i:

$$W_{H(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot W_{H(a)},$$

jednačina za donju toplotnu moć radne mase:

$$H_{d(r)} = 340 \cdot C_{(r)} + 1190 \cdot (H_{(r)} - \frac{O_{(r)}}{8}) + 93 \cdot S_{(r)} - 25 \cdot (W_{H(r)} + W_G),$$

postaje:

$$H_{d(r)} = 340 \cdot \Phi_{(a),(r)} \cdot C_{(a)} + 1190 \cdot (\Phi_{(a),(r)} \cdot H_{(a)} - \frac{\Phi_{(a),(r)} \cdot O_{(a)}}{8}) + 93 \cdot \Phi_{(a),(r)} \cdot S_{(a)} - 25 \cdot (\Phi_{(a),(r)} \cdot W_{H(a)} + W_G)$$

$$H_{d(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot (340 \cdot C_{(a)} + 1190 \cdot (H_{(a)} - \frac{O_{(a)}}{8}) + 93 \cdot S_{(a)} - 25 \cdot W_{H(a)}) - 25 \cdot W_G,$$

$$H_{d(r)} = \Phi_{(a),(r)} \cdot H_{d(a)} - 25 \cdot W_G = \frac{100 - W_G}{100} \cdot H_{d(a)} - 25 \cdot W_G.$$

Zamenom vrednosti se dobija:

$$H_{d(r)} = 0,95 \cdot 20500 - 25 \cdot 5,$$

$$H_{d(r)} = 19350 \frac{kJ}{kg} = 19,35 \frac{MJ}{kg}.$$

**Zadatak 5.**



Za poznato čvrsto gorivo sa karakteristikama:  $H_{g(r)}=18,65\text{MJ/kg}$ ;  $W_{H(r)}=4\%$ ;  $W_G=14\%$  i  $H(r)=7\%$ , potrebno je odrediti donju toplotnu moć radne mase i gornju i donju toplotnu moć analitičke mase ovog goriva.

**Rešenje:**

Donja toplotna moć radne mase goriva se određuje primenom opšte jednačine veze između gornje i donje toplotne moći, koja za radnu masu ima oblik:

$$H_{d(r)} = H_{g(r)} - 25 \cdot (9 \cdot H(r) + W_{H(r)} + W_G).$$

Odatle je:

$$H_{d(r)} = 18650 - 25 \cdot (9 \cdot 5 + 4 + 14),$$

$$H_{d(a)} = 16625 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 16,63 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}.$$

Gornja i donja toplotna moć analitičke mase goriva dobijaju se iz poznatih toplotnih moći radne mase. Najpre je potrebno naći  $\varphi_{(r),(a)}$ . Radna i analitička masa goriva su:

$$m_{G(r)} = m_C + m_H + m_O + m_N + m_S + m_A + m_{WH} + m_{WG} \text{ i}$$

$$m_{G(a)} = m_C + m_H + m_O + m_N + m_S + m_A + m_{WH} = m_{G(r)} - m_{WG}.$$

Dalje je:

$$\varphi_{(r),(a)} = \frac{C_{(a)}}{C_{(r)}} = \frac{\frac{m_C}{m_{G(a)}} \cdot 100}{\frac{m_C}{m_{G(r)}} \cdot 100} = \frac{\frac{m_C}{m_{G(r)} - m_{WG}} \cdot 100}{\frac{m_C}{m_{G(r)}} \cdot 100},$$

$$\varphi_{(r),(a)} = \frac{100}{\frac{m_{G(r)} - m_{WG}}{m_{G(r)}} \cdot 100} = \frac{100}{100 - \frac{m_{WG}}{m_{G(r)}} \cdot 100},$$

$$\varphi_{(r),(a)} = \frac{100}{100 - W_G}.$$

Jednačine kojima se određuje gornja i donja toplotna moć analitičke mase:

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

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

imajući u vidu da je:

$$C_{(a)} = \varphi_{(r),(a)} \cdot C_{(r)}, \quad H_{(a)} = \varphi_{(r),(a)} \cdot H_{(r)}, \quad O_{(a)} = \varphi_{(r),(a)} \cdot O_{(r)}, \quad S_{(a)} = \varphi_{(r),(a)} \cdot S_{(r)},$$

$$W_{H(a)} = \varphi_{(r),(a)} \cdot W_{H(r)} \text{ i}$$

$$H_{d(r)} = 340 \cdot C_{(r)} + 1190 \cdot (H_{(r)} - \frac{O_{(r)}}{8}) + 93 \cdot S_{(r)} - 25 \cdot (W_{H(r)} + W_G),$$

moгу se predstaviti kao:

$$H_{g(a)} = 340 \cdot \varphi_{(r),(a)} \cdot C_{(r)} + 1420 \cdot (\varphi_{(r),(a)} \cdot H_{(r)} - \frac{\varphi_{(r),(a)} \cdot O_{(r)}}{8}) + 93 \cdot \varphi_{(r),(a)} \cdot S_{(r)},$$

$$H_{g(a)} = \varphi_{(r),(a)} \cdot (340 \cdot C_{(r)} + 1420 \cdot (H_{(r)} - \frac{O_{(r)}}{8}) + 93 \cdot S_{(r)}),$$

$$H_{g(a)} = \Phi_{(r),(a)} \cdot H_{g(r)} = \frac{100}{100 - W_G} \cdot H_{g(r)} \text{ i}$$

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

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

$$H_{d(a)} = \Phi_{(r),(a)} \cdot (H_{d(r)} + 25 \cdot W_G) = \frac{100}{100 - W_G} \cdot (H_{d(r)} + 25 \cdot W_G).$$

Zamenom vrednosti se konačno dobija:

$$\Phi_{(r),(a)} = \frac{100}{100 - 14},$$

$$\Phi_{(r),(a)} = 1,16,$$

$$H_{g(a)} = 1,16 \cdot 18650,$$

$$H_{g(a)} = 21690 \frac{kJ}{kg} = 21,69 \frac{MJ}{kg} \text{ i}$$

$$H_{d(a)} = 1,16 \cdot (16625 + 25 \cdot 14),$$

$$H_{d(a)} = 19738,4 \frac{kJ}{kg} = 19,74 \frac{MJ}{kg}.$$

### Zadatak 6.

Za poznato čvrsto gorivo sa karakteristikama:  $H_{g(a)}=20,63\text{MJ/kg}$ ;  $H_{g(g)}=27,85\text{MJ/kg}$ ;  $H_{g(r)}=16,92\text{MJ/kg}$ ;  $W_{H(r)}=9,5\%$  i  $H_{(r)}=3,1\%$ , potrebno je odrediti donje toplotne moći radne, analitičke i gorive mase.

### Rešenje:

Da bi se donja toplotna moć radne mase goriva odredila iz jednačine veze gornje i donje toplotne moći:

$$H_{d(r)} = H_{g(r)} - 25 \cdot (9 \cdot H_{(r)} + W_{H(r)} + W_G),$$

potrebno je najpre naći udeo grube vlage (u radnoj masi goriva). To je moguće jer su zadatkom zadate gornje toplotne moći radne i analitičke mase, a veza između njih se može predstaviti jednačinom:

$$H_{g(a)} = \Phi_{(r),(a)} \cdot H_{g(r)} = \frac{100}{100 - W_G} \cdot H_{g(r)}.$$

Prema tome, sadržaj grube vlage je:

$$W_G = 100 - \frac{H_{g(r)}}{H_{g(a)}} \cdot 100.$$

Zamenom zadatih vrednosti u prethodnu jednačinu može se odrediti sadržaj grube vlage, a zatim će se iz jednačine veze gornje i donje toplotne moći radne mase dobiti donja toplotna moć radne mase:

$$W_G = 100 - \frac{16,92}{20,63} \cdot 100,$$

$$W_G = 18\% \text{ i}$$

$$H_{d(r)} = 16920 - 25 \cdot (9 \cdot 3,1 + 9,5 + 18) ,$$

$$H_{d(r)} = 15535 \frac{kJ}{kg} = 15,54 \frac{MJ}{kg} .$$

Donja toplotna moć analitičke mase se može odrediti iz jednačine veze sa gornjom toplotnom moći analitičke mase:

$$H_{d(a)} = H_{g(a)} - 25 \cdot (9 \cdot H_{(a)} + W_{H(a)}) ,$$

ali je najpre potrebno izračunati udele vodonika i higroskopne vlage u analitičkoj masi goriva pomoću jednačina:

$$H_{(a)} = \Phi_{(r),(a)} \cdot H_{(r)} = \frac{100}{100 - W_G} \cdot H_{(r)} \text{ i}$$

$$W_{H(a)} = \Phi_{(r),(a)} \cdot W_{H(r)} = \frac{100}{100 - W_G} \cdot W_{H(r)} .$$

Zamenom vrednosti se dobija:

$$\Phi_{(r),(a)} = \frac{100}{100 - 18} ,$$

$$\Phi_{(r),(a)} = 1,22 ,$$

$$H_{(a)} = 1,22 \cdot 3,1 ,$$

$$H_{(a)} = 3,78\% ,$$

$$W_{H(a)} = 1,22 \cdot 9,5 ,$$

$$W_{H(a)} = 11,59\% \text{ i}$$

$$H_{d(a)} = 20630 - 25 \cdot (9 \cdot 3,78 + 11,6) ,$$

$$H_{d(a)} = 19489,8 \frac{kJ}{kg} = 19,49 \frac{MJ}{kg} .$$

Donju toplotnu moć analitičke mase takođe je moguće dobiti direktno iz veze sa donjom toplotnom moći radne mase:

$$H_{d(a)} = \Phi_{(r),(a)} \cdot (H_{d(r)} + 25 \cdot W_G) = \frac{100}{100 - W_G} \cdot (H_{d(r)} + 25 \cdot W_G) .$$

Zamenom vrednosti se dobija:

$$H_{d(a)} = 1,22 \cdot (15535 + 25 \cdot 18) ,$$

$$H_{d(a)} = 19493,9 \frac{kJ}{kg} = 19,49 \frac{MJ}{kg} .$$

Jednačina kojom se određuje donja toplotna moć gorive mase dobija se iz jednačine:

$$H_{d(g)} = 340 \cdot C_{(g)} + 1190 \cdot (H_{(g)} - \frac{O_{(g)}}{8}) + 93 \cdot S_{(g)} .$$

Zamenom jednakosti:

$$C_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot C_{(a)} , O_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot O_{(a)} , N_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot N_{(a)} \text{ i } S_{(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot S_{(a)}$$

u prethodnu jednačinu, dobija se :

$$H_{d(g)} = 340 \cdot \Phi_{(a),(g)} \cdot C_{(a)} + 1190 \cdot (\Phi_{(a),(g)} \cdot H_{(a)} - \frac{\Phi_{(a),(g)} \cdot O_{(a)}}{8}) + 93 \cdot \Phi_{(a),(g)} \cdot S_{(a)},$$

$$H_{d(g)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot (340 \cdot C_{(a)} + 1190 \cdot (H_{(a)} - \frac{O_{(a)}}{8}) + 93 \cdot S_{(a)}).$$

Poslednja jednačina, imajući u vidu jednačinu za donju toplotnu moć analitičke mase goriva:

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

kao i da je:

$$\Phi_{(a),(g)} = \frac{100}{100 - (A_{(a)} + W_{H(a)})},$$

može da se napiše i kao:

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

U ovom slučaju je potrebno odrediti i odnos  $\Phi_{(a),(g)}$ . To je moguće ako se ima u vidu jednačina koja povezuje gornje toplotne moći analitičke i gorive mase, koje su poznate:

$$H_{g(a)} = \Phi_{(a),(g)} \cdot H_{g(a)} = \frac{100}{100 - (A_{(a)} + W_{H(a)})} \cdot H_{g(a)}.$$

Prema tome je:

$$\Phi_{(a),(g)} = \frac{H_{g(g)}}{H_{g(a)}}.$$

Zamenom vrednosti se konačno dobija:

$$\Phi_{(a),(g)} = \frac{27,85}{20,63},$$

$$\Phi_{(a),(g)} = 1,35 \text{ i}$$

$$H_{d(g)} = 1,35 \cdot (19489,8 + 25 \cdot 11,59),$$

$$H_{d(g)} = 26702,7 \frac{kJ}{kg} = 26,7 \frac{MJ}{kg}.$$

## 2. Sagorevanje tečnih i gasovitih goriva

### Zadatak 7.

Napisati stehiometrijsku jednačinu potpunog sagorevanja propana ( $C_3H_8$ ) i na osnovu nje odrediti količinu kiseonika (u kg/kg, kg/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>/kg i m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) teorijski potrebnu za sagorevanje navedenog goriva.

### Rešenje:

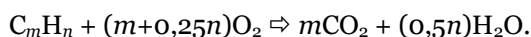
Najpre je potrebno napisati opštu jednačinu koja povezuje 3 bitne veličine: količinu materije, masu i zapreminu nekog hemijskog jedinjenja:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{V}{V_m}$$

U vezi sa ovim, može se smatrati da molarne zapremine gasova na tzv. normalnim uslovima (pritisak 1,0133bar i temperatura 0°C) imaju istu vrednost:

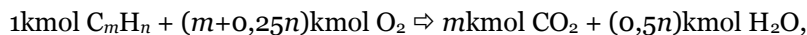
$$V_m = 22,4 \frac{m^3}{kmol}$$

U opštem slučaju, tj. za bilo koje ugljovodonično gorivo, hemijsku formulu goriva možemo prikazati kao  $C_mH_n$ , jer u sastav molekula ovih goriva ulaze samo atomi ugljenika (u opštem slučaju se njihov broj označava sa  $m$ ) i atomi vodonika (kojih ima  $n$ ). Stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanja ugljovodonika  $C_mH_n$  ima oblik:



Napomena: Oznake  $m$  i  $n$  u hemijskim formulama molekula ugljovodonika ili drugih molekula ne treba mešati sa oznakama za masu i količinu materije!

Ova jednačina se na nivou količina materije može napisati kao:



što znači da je za sagorevanje 1kmol ugljovodonika  $C_mH_n$  potrebno  $(m+0,25n)kmol$  kiseonika, a da tako nastaje  $mkmol$  ugljen-dioksida i  $0,5nkmol$  vode. Iz toga se može zaključiti da je minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje ovog ugljovodoničnog goriva:

$$O_{\min} = \frac{(m+0,25n)kmol O_2}{1kmol C_mH_n},$$

ili kraće:

$$O_{\min} [kmol / kmol] = m + 0,25n.$$

Prethodna jednačina, izražena na nivou količina materije, može se izraziti i na nivou masa, tako što se količine materija ugljovodonika  $C_mH_n$ , kiseonika, ugljen-dioksida i vode pomnože njihovim molarnim masama:

$$M_{C_mH_n} [kg / kmol] = 12m + n, \quad M_{O_2} = 32 \frac{kg}{kmol}, \quad M_{CO_2} = 44 \frac{kg}{kmol} \quad \text{i} \quad M_{H_2O} = 18 \frac{kg}{kmol},$$

pa se dobija:

$$\begin{aligned} & (1kmol \cdot (12m+n)kg/kmol) C_mH_n + ((m+0,25n)kmol \cdot 32kg/kmol) O_2 \Rightarrow \\ & \Rightarrow (mkmol \cdot 44kg/kmol) CO_2 + ((0,5n)kmol \cdot 18kg/kmol) H_2O, \end{aligned}$$

odnosno:

$$(12m+n)kg C_mH_n + 32(m+0,25n)kg O_2 \Rightarrow 44mkg CO_2 + 0,5nkg H_2O.$$

To znači da je za potpuno sagorevanje 1kmol, odnosno  $(12m+n)kg$  ugljovodonika  $C_mH_n$  potrebno  $32(m+0,25n)kg$  kiseonika, odnosno da je minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje ovog goriva:

$$O_{\min} = \frac{32(m+0,25n)kg O_2}{(12m+n)kg C_m H_n},$$

ili kraće:

$$O_{\min} [kg / kg] = \frac{32(m+0,25n)}{12m+n}.$$

Slično tome, jednačina sagorevanja ugljovodonika  $C_m H_n$ , izražena na nivou količina materije, može se izraziti i na nivou zapremina tako što se količine materija ugljovodonika  $C_m H_n$ , kiseonika, ugljen-dioksida i vode pomnože njihovim molarnim zapreminama, koje na normalnim uslovima (pritisak 1,0133bar i temperatura 0°C) imaju istu vrednost:

$$V_m = 22,4 \frac{m^3}{kmol}.$$

Tako se dobija:

$$(1kmol \cdot 22,4m^3/kmol) C_m H_n + ((m+0,25n)kmol \cdot 22,4m^3/kmol) O_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow (mkmol \cdot 22,4m^3/kmol) CO_2 + (0,5n)kmol \cdot 22,4m^3/kmol) H_2O,$$

odnosno:

$$22,4m^3 C_m H_n + 22,4(m+0,25n)m^3 O_2 \Rightarrow (22,4m)m^3 CO_2 + (11,2n)m^3 H_2O.$$

Prema tome, zapremina kiseonika teorijski potrebnog za sagorevanje 1kmol ili  $22,4m^3 C_m H_n$  iznosi:

$$O_{\min} = \frac{22,4(m+0,25n)m^3 O_2}{22,4m^3 C_m H_n} = \frac{(m+0,25n)m^3 O_2}{1m^3 C_m H_n},$$

odnosno:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = m + 0,25n.$$

Vrednosti minimalne teorijski potrebne količine kiseonika izražene u kmol/kmol i u  $m^3/m^3$  su jednake, što je i logično ako se ima u vidu da su molarne zapremine gasova jednake, tj.  $22,4m^3/kmol$ .

Ako se ima u vidu da su jednačine:

$$(12m+n)kg C_m H_n + 32(m+0,25n)kg O_2 \Rightarrow 44mkg CO_2 + 0,5nkg H_2O \text{ i}$$

$$22,4m^3 C_m H_n + 22,4(m+0,25n)m^3 O_2 \Rightarrow (22,4m)m^3 CO_2 + (11,2n)m^3 H_2O$$

napisane na osnovu istih količina materije, tj. na osnovu jednačine:

$$1kmol C_m H_n + (m+0,25n)kmol O_2 \Rightarrow mkmol CO_2 + (0,5n)kmol H_2O,$$

još se može reći i da je za sagorevanje 1kmol  $C_m H_n$ , odnosno  $22,4m^3 C_m H_n$  potrebno  $32(m+0,25n)kg$  kiseonika i obrnuto, tj. da je za sagorevanje  $(12m+n)kg C_m H_n$ , što je takođe jednako 1kmol  $C_m H_n$ , potrebno  $22,4(m+0,25n)m^3$  kiseonika, odnosno:

$$O_{\min} = \frac{32(m+0,25n)kg O_2}{22,4m^3 C_m H_n} = \frac{1,43(m+0,25n)kg O_2}{1m^3 C_m H_n} \text{ i}$$

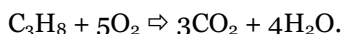
$$O_{\min} = \frac{22,4(m+0,25n)m^3 O_2}{(12m+n)kg C_m H_n},$$

ili:

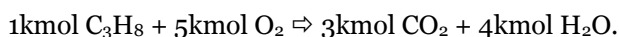
$$O_{\min} [kg / m^3] = 1,43(m+0,25n) \text{ i}$$

$$O_{\min} [m^3 / kg] = \frac{22,4(m+0,25n)}{12m+n}.$$

U slučaju propana ( $C_3H_8$ ), stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanja ima oblik:



Iz ove stehiometrijske jednačine se vidi da je:



Odmah se može uočiti da je za potpuno sagorevanje 1kmol propana potrebno 5kmol kiseonika, tj. da je:

$$O_{\min} = 5 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}},$$

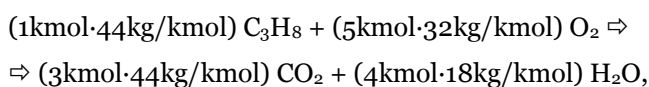
a to znači i da je:

$$O_{\min} = 5 \frac{m^3}{m^3}.$$

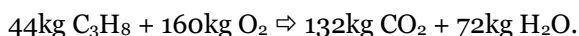
Imajući u vidu da je molarna masa propana:

$$M_{C_3H_8} = 44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}},$$

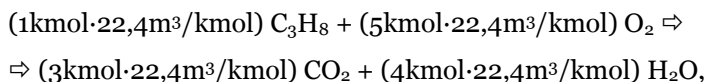
kao i poznate molarne mase kiseonika (32kg/kmol), ugljen-dioksida (44kg/kmol) i vode (18kg/kmol), može se dalje dobiti:



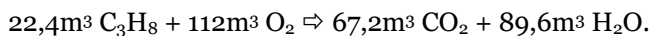
odnosno:



Takođe, imajući u vidu molarne zapremine gasova na normalnim uslovima (22,4m<sup>3</sup>/kmol), može se dobiti:



odnosno:



Može se uočiti da je za potpuno sagorevanje 1kmol propana, što predstavlja 44kg, odnosno 22,4m<sup>3</sup> propana, potrebno 5kmol kiseonika, što je jednako 160kg ili 112m<sup>3</sup> kiseonika, pa je:

$$O_{\min} = \frac{5\text{kmol } O_2}{1\text{kmol } C_3H_8} = \frac{160\text{kg } O_2}{44\text{kg } C_3H_8} = \frac{160\text{kg } O_2}{22,4\text{m}^3 C_3H_8} = \frac{112\text{m}^3 O_2}{44\text{kg } C_3H_8} = \frac{112\text{m}^3 O_2}{22,4\text{m}^3 C_3H_8},$$

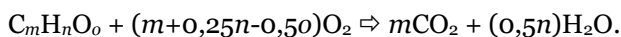
$$O_{\min} = 5 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 3,64 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = 7,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,55 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}.$$

### Zadatak 8.

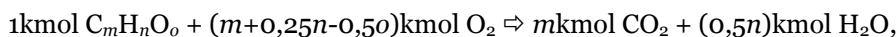
Napisati stehiometrijsku jednačinu potpunog sagorevanja metil-alkohola (CH<sub>3</sub>OH) i na osnovu nje odrediti količinu kiseonika (u kg/kg, kg/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>/kg i m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) teorijski potrebnu za sagorevanje navedenog goriva.

#### Rešenje:

Za goriva čiji se molekuli sastoje iz atoma ugljenika (kojih u opštem slučaju ima *m*), vodonika (kojih ima *n*) i kiseonika (kojih ima *o*), tj. čija je opšta hemijska formula C<sub>*m*</sub>H<sub>*n*</sub>O<sub>*o*</sub> (npr. alkoholi), stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanja ima oblik:



Ova jednačina se na nivou količina materije može napisati kao:



na osnovu čega se dobija da je:

$$O_{\min} [\text{kmol} / \text{kmol}] = m + 0,25n - 0,50 .$$

Imajući u vidu da je molarna masa goriva  $C_mH_nO_o$  jednaka:

$$M_{C_mH_nO_o} [\text{kg} / \text{kmol}] = 12m + n + 16o ,$$

kao i poznate molarne mase kiseonika, ugljen-dioksida i vode, jednačina sagorevanja se sa nivoa količina materije može izraziti na nivou masa:

$$\begin{aligned} & (1\text{kmol} \cdot (12m+n+16o)\text{kg/kmol}) C_mH_nO_o + (m+0,25n-0,50)\text{kmol} \cdot 32\text{kg/kmol} O_2 \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow (m\text{kmol} \cdot 44\text{kg/kmol}) CO_2 + (0,5n)\text{kmol} \cdot 18\text{kg/kmol} H_2O, \end{aligned}$$

odnosno:

$$(12m+n+16o)\text{kg} C_mH_nO_o + 32(m+0,25n-0,50)\text{kg} O_2 \Leftrightarrow 44m\text{kg} CO_2 + 9n\text{kg} H_2O,$$

pa je:

$$O_{\min} [\text{kg} / \text{kg}] = \frac{32(m+0,25n-0,50)}{12m+n+16o} .$$

Uzimajući da je molarna zapremina gasova na normalnim uslovima:

$$V_m = 22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} ,$$

jednačina sagorevanja se može izraziti i na nivou zapremina:

$$\begin{aligned} & (1\text{kmol} \cdot 22,4\text{m}^3/\text{kmol}) C_mH_nO_o + (m+0,25n-0,50)\text{kmol} \cdot 22,4\text{m}^3/\text{kmol} O_2 \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow (m\text{kmol} \cdot 22,4\text{m}^3/\text{kmol}) CO_2 + (0,5n)\text{kmol} \cdot 22,4\text{m}^3/\text{kmol} H_2O, \end{aligned}$$

odnosno:

$$22,4\text{m}^3 C_mH_nO_o + 22,4(m+0,25n-0,50)\text{m}^3 O_2 \Leftrightarrow (22,4m)\text{m}^3 CO_2 + (11,2n)\text{m}^3 H_2O,$$

odakle je:

$$O_{\min} [\text{m}^3 / \text{m}^3] = m + 0,25n - 0,50 .$$

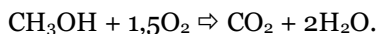
Uočava se da su vrednosti minimalne teorijski potrebne količine kiseonika izražene u  $\text{kmol}/\text{kmol}$  i u  $\text{m}^3/\text{m}^3$  jednake, što je i logično s obzirom da su molarne zapremine gasova jednake, tj.  $22,4\text{m}^3/\text{kmol}$ .

Kombinovanjem jednačina sagorevanja na nivou masa i nivou zapremina, a imajući u vidu da se obe odnose na istu količinu (1kmol) goriva  $C_mH_nO_o$ , može se dobiti i:

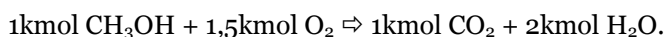
$$O_{\min} [\text{kg} / \text{m}^3] = 1,43(m + 0,25n - 0,50) \text{ i}$$

$$O_{\min} [\text{m}^3 / \text{kg}] = \frac{22,4(m+0,25n-0,50)}{12m+n+16o} .$$

Za slučaj metil-alkohola (čiji molekul ima 1 atom ugljenika, 4 atoma vodonika i 1 atom kiseonika), stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanja glasi:



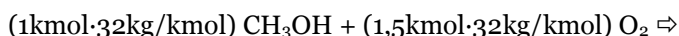
Ova jednačina se na nivou količina materije može napisati kao:



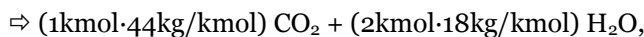
Imajući u vidu da je molarna masa metil-alkohola:

$$M_{CH_3OH} = 32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} ,$$

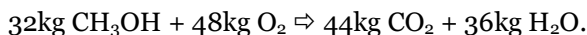
kao i poznate molarne mase kiseonika, ugljen-dioksida i vode, dalje je:



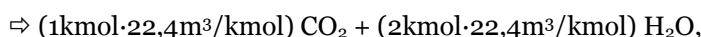
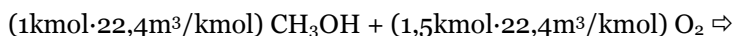




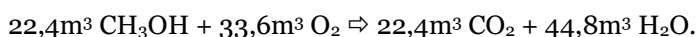
odnosno:



Takođe, imajući u vidu molarne zapremine gasova na normalnim uslovima, može se dobiti:



odnosno:



Prema tome, minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje metilalkohola je:

$$O_{\min} = \frac{1,5\text{kmol O}_2}{1\text{kmol CH}_3\text{OH}} = \frac{48\text{kg O}_2}{32\text{kg CH}_3\text{OH}} = \frac{48\text{kg O}_2}{22,4\text{m}^3 \text{CH}_3\text{OH}} = \frac{33,6\text{m}^3 \text{O}_2}{32\text{kg CH}_3\text{OH}} = \frac{33,6\text{m}^3 \text{O}_2}{22,4\text{m}^3 \text{CH}_3\text{OH}}$$

odnosno:

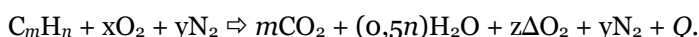
$$O_{\min} = 1,5 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 1,5 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = 2,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,05 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}.$$

### Zadatak 9.

Sagorevanje benzola ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) odvija se u vazduhu sa koeficijentom viška vazduha  $\lambda=1,3$ . Izračunati procentualni zapreminski sadržaj vlažnih produkata sagorevanja.

#### Rešenje:

U opštem slučaju, sagorevanje ugljovodonika  $\text{C}_m\text{H}_n$  u vazduhu se predstavlja hemijskom jednačinom prema kojoj pomenuti ugljovodonik sa kiseonikom iz vazduha, a uz prisustvo azota iz vazduha, reaguje stvarajući ugljen-dioksid, vodu i oslobađajući određenu količinu toplote,  $Q$ . U produktima sagorevanja se pored ugljen-dioksida i vode nalazi i azot iz vazduha u čijem je prisustvu došlo do reakcije i, eventualno, ukoliko je  $\lambda > 1$ , višak kiseonika ( $\Delta\text{O}_2$ ):



Količine kiseonika koji ulazi u reakciju, azota uz čije se prisustvo reakcija odvija i viška kiseonika u produktima sagorevanja, ovde redom označenih sa  $x$ ,  $y$  i  $z$ , zavise od vrednosti koeficijenta viška vazduha,  $\lambda$ , i minimalne teorijski potrebne količine kiseonika za potpuno sagorevanje.

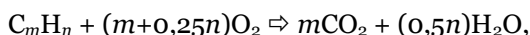
Udeo kiseonika u vazduhu se može smatrati konstantnim, pa, imajući u vidu:

$$L_S = \lambda L_{\min},$$

važi i:

$$O_S = \lambda O_{\min}.$$

Minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje nalazi se iz stehiometrijske jednačine sagorevanja:



i iznosi:

$$O_{\min} [\text{kmol} / \text{kmol}] = m + 0,25n.$$

Količina kiseonika koji ulazi u reakciju je zapravo stvarna količina kiseonika koja se dovodi za sagorevanje,  $O_S$ :

$$x = n_{\text{O}_2} = O_S = \lambda O_{\min},$$

dok višak kiseonika koji se javlja u produktima sagorevanja predstavlja razliku stvarne i teorijski potrebne količine:

$$z = n_{\Delta O_2} = O_S - O_{\min} = (\lambda - 1)O_{\min}.$$

Pošto i kiseonik i azot koji ulaze u reakciju potiču iz vazduha, odnos njihovih količina materije jednak je odnosu koji važi u vazduhu. Zbog jednakih molarnih zapremina ( $22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ , na normalnim uslovima), a imajući u vidu da je količina materije:

$$n = \frac{V}{V_m} = \frac{V}{22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}},$$

odnos količina materije kiseonika i azota jednak je odnosu njihovih zapremina:

$$\frac{x}{y} = \frac{n_{O_2}}{n_{N_2}} = \frac{\frac{V_{O_2}}{V_m}}{\frac{V_{N_2}}{V_m}} = \frac{V_{O_2}}{V_{N_2}} = \frac{21}{79} = \frac{1}{3,76},$$

pa je količina azota:

$$y = n_{N_2} = 3,76x = 3,76O_S = 3,76\lambda O_{\min}.$$

Zapremine produkata sagorevanja su:

$$V_{CO_2} = n_{CO_2}V_m, V_{H_2O} = n_{H_2O}V_m, V_{\Delta O_2} = n_{\Delta O_2}V_m = zV_m \text{ i } V_{N_2} = n_{N_2}V_m = yV_m,$$

a ukupna zapremina goriva je:

$$V_G = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{\Delta O_2} + V_{N_2},$$

$$V_G = (n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2})V_m = (m + 0,5n + z + y)V_m.$$

Procentualni zapreminski sastav produkata sagorevanja se određuje preko jednačina:

$$CO_{2(vol)}[\%vol] = \frac{V_{CO_2}}{V_G} \cdot 100,$$

$$CO_{2(vol)}[\%vol] = \frac{n_{CO_2}V_m}{(n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2})V_m} \cdot 100 = \frac{n_{CO_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2}} \cdot 100,$$

$$CO_{2(vol)}[\%vol] = \frac{m}{m + 0,5n + z + y} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = \frac{V_{H_2O}}{V_G} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = \frac{n_{H_2O}V_m}{(n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2})V_m} \cdot 100 = \frac{n_{H_2O}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2}} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = \frac{0,5n}{m + 0,5n + z + y} \cdot 100,$$

$$\Delta O_{2(vol)}[\%vol] = \frac{V_{\Delta O_2}}{V_G} \cdot 100,$$

$$\Delta O_{2(vol)}[\%vol] = \frac{n_{\Delta O_2}V_m}{(n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2})V_m} \cdot 100 = \frac{n_{\Delta O_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2}} \cdot 100,$$

$$\Delta O_{2(vol)}[\%vol] = \frac{z}{m + 0,5n + z + y} \cdot 100 \text{ i}$$

$$N_{2(vol)}[\%vol] = \frac{V_{N_2}}{V_G} \cdot 100,$$

$$N_{2(vol)}[\%vol] = \frac{n_{N_2} V_m}{(n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2}) V_m} \cdot 100 = \frac{n_{N_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{\Delta O_2} + n_{N_2}} \cdot 100,$$

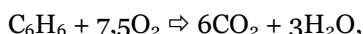
$$N_{2(vol)}[\%vol] = \frac{y}{m + 0,5n + z + y} \cdot 100.$$

I iz ovih jednačina se jasno vidi da su odnosi količina materije jednaki odnosima zapremina.

Sagorevanje benzola u vazduhu, se predstavlja jednačinom:



Minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje benzola nalazi se iz stehiometrijske jednačine sagorevanja:



i iznosi:

$$O_{\min} = 7,5 \frac{kmol}{kmol}.$$

Količina kiseonika koji ulazi u reakciju, tj. stvarna količina kiseonika koja se dovodi za sagorevanje je:

$$x = O_S = \lambda O_{\min},$$

$$x = O_S = 1,3 \cdot 7,5,$$

$$x = O_S = 9,75 \frac{kmol}{kmol},$$

dok je višak kiseonika koji se javlja u produktima sagorevanja:

$$z = O_S - O_{\min} = (\lambda - 1) O_{\min},$$

$$z = (1,3 - 1) \cdot 7,5,$$

$$z = 2,25 \frac{kmol}{kmol}.$$

Količina azota će iznositi:

$$y = 3,76x = 3,76O_S = 3,76\lambda O_{\min},$$

$$y = 3,76 \cdot 1,3 \cdot 7,5,$$

$$y = 36,66 \frac{kmol}{kmol}.$$

Treba napomenuti da za potrebe ovog zadatka, kao što se i vidi, nije bilo neophodno odrediti vrednost  $x$ , odnosno  $O_S$ .

Jednačina sagorevanja benzola u vazduhu sada poprima svoj konačni oblik:



Sada je moguće odrediti procentualni zapreminski sastav produkata sagorevanja:

$$CO_{2(vol)}[\%vol] = \frac{m}{m + 0,5n + z + y} \cdot 100,$$

$$CO_{2(vol)}[\%vol] = \frac{6}{6 + 3 + 2,25 + 36,66} \cdot 100,$$

$$CO_{2(vol)}[\%vol] = 12,52\%$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = \frac{0,5n}{m + 0,5n + z + y} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = \frac{3}{6 + 3 + 2,25 + 36,66} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = 6,26\%$$

$$\Delta O_{2(vol)}[\%vol] = \frac{z}{m + 0,5n + z + y} \cdot 100,$$

$$\Delta O_{2(vol)}[\%vol] = \frac{2,25}{6 + 3 + 2,25 + 36,66} \cdot 100,$$

$$\Delta O_{2(vol)}[\%vol] = 4,69\% \text{ i}$$

$$N_{2(vol)}[\%vol] = \frac{y}{m + 0,5n + z + y} \cdot 100,$$

$$N_{2(vol)}[\%vol] = \frac{36,66}{6 + 3 + 2,25 + 36,66} \cdot 100,$$

$$N_{2(vol)}[\%vol] = 76,52\%.$$

**Zadatak 10.**

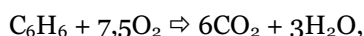
U vazduhu sagoreva 1kmol benzola (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>). Utvrđeno je da je sadržaj vode u produktima sagorevanja približno 6,1%vol. Ako se pretpostavi da je sagorevanje potpuno, odrediti koeficijent viška vazduha.

**Rešenje:**

Sagorevanje benzola u vazduhu, se predstavlja jednačinom:



Minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje benzola nalazi se iz stehiometrijske jednačine sagorevanja:



i ima vrednost:

$$O_{\min} = 7,5 \frac{kmol}{kmol}.$$

Zapreminski udeo vode u produktima sagorevanja je:

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = 6,1\%vol = \frac{3}{6 + 3 + z + y} \cdot 100.$$

Imajući u vidu da je:

$$z = (\lambda - 1)O_{\min} \text{ i}$$

$$y = 3,76\lambda O_{\min},$$

dobija se:

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = 6,1\%vol = \frac{3}{6 + 3 + (\lambda - 1)O_{\min} + 3,76\lambda O_{\min}} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = 6,1\%vol = \frac{3}{6 + 3 - O_{\min} + 4,76\lambda O_{\min}} \cdot 100,$$

ili:

$$6,1 = \frac{3}{6 + 3 - 7,5 + 4,76 \cdot 7,5 \cdot \lambda} \cdot 100,$$

$$6,1 = \frac{3}{1,5 + 35,7 \cdot \lambda} \cdot 100.$$

Odatle je:

$$\lambda = \frac{1}{35,7} \left( \frac{3}{6,1} \cdot 100 - 1,5 \right),$$

$$\lambda = 1,34.$$

### Zadatak 11.

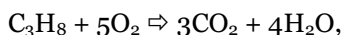
U vazduhu sagoreva 1kmol propana ( $C_3H_8$ ). Utvrđeno je da je sadržaj vode u produktima sagorevanja približno 10%vol. Ako se pretpostavi da je sagorevanje potpuno, odrediti koeficijent viška vazduha.

#### Rešenje:

Jednačina sagorevanja propana u vazduhu je:



Minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje benzola nalazi se iz stehiometrijske jednačine sagorevanja:



i njena vrednost je:

$$O_{\min} = 5 \frac{kmol}{kmol}.$$

Zapreminski udeo vode u produktima sagorevanja je:

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = 10\%vol = \frac{4}{3 + 4 + z + y} \cdot 100.$$

Kako je:

$$z = (\lambda - 1)O_{\min} \text{ i}$$

$$y = 3,76\lambda O_{\min},$$

dobija se:

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = 10\%vol = \frac{4}{3 + 4 + (\lambda - 1)O_{\min} + 3,76\lambda O_{\min}} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = 10\%vol = \frac{4}{3 + 4 - O_{\min} + 4,76\lambda O_{\min}} \cdot 100,$$

odnosno:

$$10 = \frac{4}{3 + 4 - 5 + 4,76 \cdot 5 \cdot \lambda} \cdot 100,$$

$$10 = \frac{4}{2 + 23,8 \cdot \lambda} \cdot 100.$$

Konačno je:

$$\lambda = \frac{1}{23,8} \left( \frac{4}{10} \cdot 100 - 2 \right),$$

$$\lambda = 1,6.$$

**Zadatak 12.**

Gasovito gorivo ima sledeći zapreminski sastav:  $H_2=9\%$ ;  $CO_2=13\%$ ;  $CO=24\%$ ;  $O_2=5\%$ ;  $CH_4=3\%$ ; i  $N_2=46\%$ . Ako se sagorevanje odvija sa koeficijentom viška vazduha  $\lambda=1,42$ , potrebno je odrediti:

- (a) stvarnu količinu vazduha potrebnog za sagorevanje ovog gasa, u  $m^3/m^3$  i
- (b) količine svih produkata sagorevanja, u  $m^3/m^3$ .

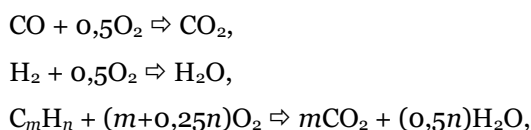
**Rešenje:**

U zadatku je zadat procentualni zapreminski sastav goriva, na osnovu koga se lako mogu odrediti zapreminski udeli pojedinačnih komponenti u ukupnoj zapremini goriva izraženi u  $m^3$  svake od komponenti po  $1m^3$  ukupne zapremine goriva, tj.  $m^3/m^3$ :

$$r_{CO_2}[m^3 / m^3] = \frac{CO_2}{100}, r_{CO}[m^3 / m^3] = \frac{CO}{100}, r_{H_2}[m^3 / m^3] = \frac{H_2}{100}, r_{C_mH_n}[m^3 / m^3] = \frac{C_mH_n}{100},$$

$$r_{O_2}[m^3 / m^3] = \frac{O_2}{100} \text{ i } r_{N_2}[m^3 / m^3] = \frac{N_2}{100}.$$

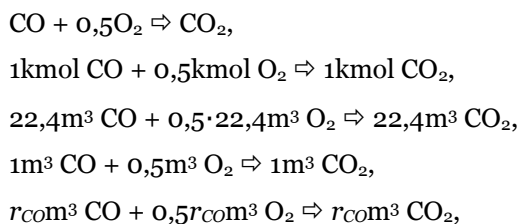
Kada je gasovito gorivo definisano zapreminskim sastavom i sastoji se od molekula vodonika, kiseonika, azota, ugljen-dioksida, ugljen-monoksida i više vrsta ugljovodonika koji se mogu prikazati opštom formulom  $C_mH_n$ , tada se sagorevanje svake od sagorivih komponenti goriva može predstaviti stehiometrijskim jednačinama:



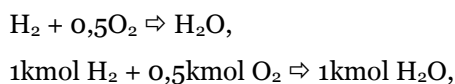
gde poslednja jednačina važi za sve ugljovodonike koji se nalaze u gorivu.

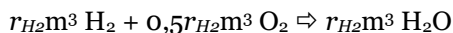
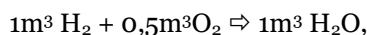
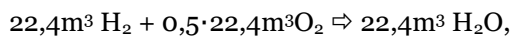
Iz ovih jednačina se vidi da je za sagorevanje 1kmol ugljen-monoksida koji se nalazi u gorivu potrebno 0,5kmol kiseonika, za sagorevanje 1kmol vodonika iz goriva takođe 0,5kmol kiseonika, a da za sagorevanje 1kmol bilo kog ugljovodonika koji ima  $m$  atoma ugljenika i  $n$  atoma vodonika treba  $(m+0,25n)$ kmol kiseonika. Ako se ima u vidu da je kod gasova, zbog konstantne molarne zapremine ( $22,4m^3/kmol$ , na normalnim uslovima), minimalna teorijska količina kiseonika potrebna za potpuno sagorevanje ima istu vrednost kada se izražava u kmol/kmol i u  $m^3/m^3$ , onda se može konstatovati da je za sagorevanje  $1m^3$  ugljen-monoksida i  $1m^3$  vodonika iz goriva potrebno po  $0,5m^3$  kiseonika, a za sagorevanje  $1m^3$  ugljovodonika  $C_nH_m$   $(m+0,25n)m^3$  kiseonika, odnosno da kada sagoreva  $1m^3$  goriva, odnosno  $r_{CO}m^3$  ugljen-monoksida,  $r_{H_2}m^3$  vodonika i  $r_{C_mH_n}m^3$  ugljovodonika  $C_mH_n$ , treba dovesti redom  $0,5r_{CO}m^3$ ,  $0,5r_{H_2}m^3$  i  $(m+0,25n)r_{C_mH_n}m^3$  kiseonika, tj:

za ugljen-monoksid:

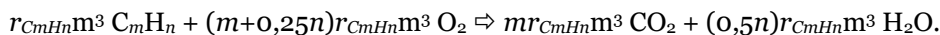
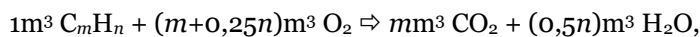
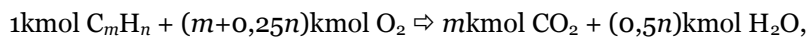
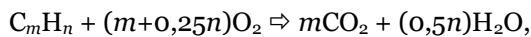


za vodonik:





i za ugljovodonike:



Minimalna potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje ovako definisanog goriva jednaka je sumi minimalnih količina kiseonika potrebnih za sagorevanje vodonika, ugljen-dioksida i svih ugljovodonika iz goriva, od koje je oduzeta količina kiseonika koja se već nalazi u gorivu, tj.  $r_{\text{O}_2}\text{m}^3$  kiseonika, jer se smatra da će se i taj kiseonik iskoristiti za sagorevanje:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,5(r_{\text{CO}} + r_{\text{H}_2}) + \Sigma(m + 0,25n)r_{\text{C}_m\text{H}_n} - r_{\text{O}_2}.$$

Minimalna količina vazduha potrebna za sagorevanje goriva je, imajući u vidu da je zapreminski udeo kiseonika u vazduhu približno jednak 21%:

$$L_{\min} [m^3 / m^3] = \frac{O_{\min} [m^3 / m^3]}{0,21}.$$

Stvarne količine kiseonika i vazduha koje potrebno dovesti radi sagorevanja goriva se mogu odrediti na osnovu minimalnih teorijski potrebnih veličina i koeficijenta viška vazduha:

$$O_S = \lambda O_{\min} \quad \text{i}$$

$$L_S = \lambda L_{\min}.$$

Zapremine produkata sagorevanja se određuju takođe na osnovu predstavljenih stehiometrijskih jednačina i poznatog zapreminskog sastava goriva i izražavaju se u  $\text{m}^3$  određenog produkta sagorevanja po  $1\text{m}^3$  goriva, tj.  $\text{m}^3/\text{m}^3$ .

Količina ugljen-dioksida u produktima sagorevanja potiče delom iz ugljen-dioksida koji se nalazio u gasovitom gorivu pre sagorevanja, a delom od sagorevanja ugljen-monoksida i svih ugljovodonika iz goriva, pri čemu, prema stehiometrijskim jednačinama, sagorevanjem  $1\text{m}^3$  ugljen-monoksida nastaje  $1\text{m}^3$  ugljen dioksida, a sagorevanjem  $1\text{m}^3$  ugljovodonika  $\text{C}_m\text{H}_n$  nastaje  $m\text{m}^3$  ugljen-dioksida:

$$V_{\text{CO}_2} [m^3 / m^3] = r_{\text{CO}_2} + r_{\text{CO}} + \Sigma r_{\text{C}_m\text{H}_n} m.$$

Količina vode u produktima sagorevanja potiče delom od vode koja se nalazila u gorivu pre sagorevanja, a delom od sagorevanja vodonika, gde sagorevanjem  $1\text{m}^3$  vodonika nastaje  $1\text{m}^3$  vode (tj. vodene pare), i ugljovodonika, gde sagorevanjem  $1\text{m}^3$  ugljovodonika  $\text{C}_m\text{H}_n$  nastaje  $(0,5n)\text{m}^3$  vode:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} [m^3 / m^3] = r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{H}_2} + 0,5 \Sigma r_{\text{C}_m\text{H}_n} n.$$

Količina kiseonika u produktima sagorevanja javlja se kada je  $\lambda > 1$  i jednaka je višku kiseonika, tj. razlici stvarno dovedenog kiseonika i teorijski potrebnog kiseonika:

$$V_{\text{O}_2} [m^3 / m^3] = O_S - O_{\min} = (\lambda - 1)O_{\min}.$$

Količina azota u produktima sagorevanja potiče delom iz azota koji se nalazi u gorivu pre sagorevanja, a delom iz vazduha koji se dovodi radi sagorevanja, i ta zapremina azota se određuje prema stvarnoj količini dovedenog kiseonika, na osnovu odnosa zapremine azota i kiseonika u vazduhu koji je jednak  $79/21=3,76$ :

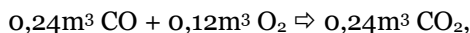
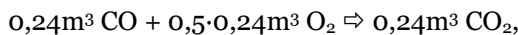
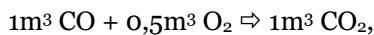
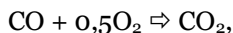
$$V_{\text{N}_2} [m^3 / m^3] = r_{\text{N}_2} + 3,76O_S = r_{\text{N}_2} + 3,76\lambda O_{\min}.$$

(a) Kada je reč o konkretnom gasovitom gorivu, zapreminski sastav se može predstaviti kao:

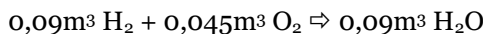
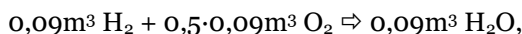
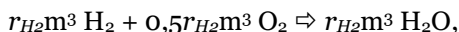
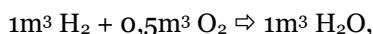
$$r_{H_2} = 0,09, r_{CO_2} = 0,13, r_{CO} = 0,24, r_{O_2} = 0,05, r_{CH_4} = 0,03 \text{ i } r_{N_2} = 0,46.$$

Jednačine sagorevanja pojedinačnih sagorivih komponenti su:

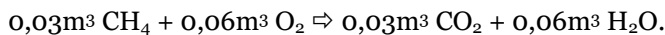
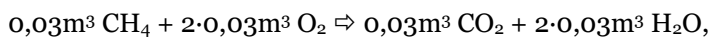
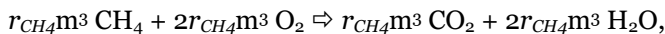
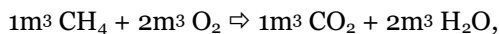
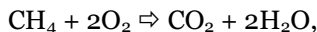
za ugljen-monoksid:



za vodonik:



i za metan:



Prema tome, za sagorevanje 0,24m<sup>3</sup> ugljen-monoksida (koliko ga ima u 1m<sup>3</sup> goriva) potrebno je 0,12m<sup>3</sup> kiseonika, za sagorevanje 0,09m<sup>3</sup> vodonika (koliko ga ima u 1m<sup>3</sup> goriva) potrebno je 0,045m<sup>3</sup> kiseonika, a za sagorevanje 0,03m<sup>3</sup> metana, 0,06m<sup>3</sup> kiseonika. Kada se ove količine kiseonika saberu i od njih oduzme kiseonik prisutan u 1m<sup>3</sup> goriva pre sagorevanja, tj. 0,05m<sup>3</sup> kiseonika, dobija se minimalna teorijski potrebna količina kiseonika:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,12 + 0,045 + 0,06 - 0,05,$$

$$O_{\min} = 0,175 \frac{m^3}{m^3}.$$

Ova vrednost se može dobiti i direktno iz formule:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,5(r_{CO} + r_{H_2}) + \Sigma(m + 0,25n)r_{CmHn} - r_{O_2},$$

odakle je:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,5(0,09 + 0,24) + (1 + 0,25 \cdot 4) \cdot 0,03 - 0,05,$$

$$O_{\min} = 0,175 \frac{m^3}{m^3}.$$

Minimalna količina vazduha potrebna za sagorevanje goriva je:

$$L_{\min} [m^3 / m^3] = \frac{O_{\min} [m^3 / m^3]}{0,21},$$

pa je:



$$L_{\min} [m^3 / m^3] = \frac{0,175}{0,21},$$

$$L_{\min} = 0,83 \frac{m^3}{m^3}.$$

Stvarna količina vazduha je:

$$L_S = \lambda L_{\min},$$

odnosno:

$$L_S = 1,42 \cdot 0,83,$$

$$L_S = 1,18 \frac{m^3}{m^3}.$$

(b) Zapremina ugljen dioksida u produktima sagorevanja izražena u  $m^3$   $CO_2$  po  $1m^3$  goriva, tj. u  $m^3/m^3$  jednaka je sumi zapremine ugljen-dioksida koja se nalazila u  $1m^3$  goriva pre sagorevanja, tj.  $0,13m^3$   $CO_2$ , i zapremina ugljen-dioksida nastalog sagorevanjem ugljen-monoksida,  $0,24m^3$   $CO_2$  za  $0,24m^3$  CO (koliko ga ima u  $1m^3$  goriva) i metana,  $0,03m^3$   $CO_2$  za  $0,03m^3$   $CH_4$  (koliko ga ima u  $1m^3$  goriva):

$$V_{CO_2} [m^3 / m^3] = 0,13 + 0,24 + 0,03,$$

$$V_{CO_2} = 0,4 \frac{m^3}{m^3}.$$

Zapremina ugljen-dioksida u produktima sagorevanja takođe se može dobiti direktnom primenom formule:

$$V_{CO_2} [m^3 / m^3] = r_{CO_2} + r_{CO} + \Sigma r_{CmHn} m,$$

$$V_{CO_2} [m^3 / m^3] = 0,13 + 0,24 + 0,03,$$

$$V_{CO_2} = 0,4 \frac{m^3}{m^3}.$$

Zapremina vode (vodene pare) u produktima sagorevanja se može odrediti tako što se količina vode koja se nalazila u gorivu pre sagorevanja, koje u ovom konkretnom primeru nema, sabere sa količinama vode nastale sagorevanjem vodonika,  $0,09m^3$   $H_2O$  za  $0,09m^3$   $H_2$ , i metana,  $0,06m^3$   $H_2O$  za  $0,03m^3$   $CH_4$ :

$$V_{H_2O} [m^3 / m^3] = 0 + 0,09 + 0,06,$$

$$V_{H_2O} = 0,15 \frac{m^3}{m^3}.$$

Zapremina vode u produktima sagorevanja se može dobiti i primenom formule:

$$V_{H_2O} [m^3 / m^3] = r_{H_2O} + r_{H_2} + 0,5 \Sigma r_{CmHn} n,$$

$$V_{H_2O} [m^3 / m^3] = 0 + 0,09 + 0,5 \cdot 0,03 \cdot 4,$$

$$V_{H_2O} = 0,15 \frac{m^3}{m^3}.$$

Zapremina kiseonika u produktima sagorevanja jednaka je razlici stvarne i minimalne teorijski potrebne količine kiseonika:

$$V_{O_2} [m^3 / m^3] = O_S - O_{\min} = (\lambda - 1) O_{\min},$$

$$V_{O_2} [m^3 / m^3] = (1,42 - 1) \cdot 0,175,$$

$$V_{O_2} = 0,07 \frac{m^3}{m^3}.$$

Zapremina azota u produktima sagorevanja jednaka je sumi zapremine azota iz dovedene količine vazduha, koja je  $79/21=3,76$  puta veća od zapremine stvarne dovedene količine kiseonika, i zapremine azota koji se nalazi u  $1m^3$  goriva, tj.  $0,46m^3 N_2$ :

$$V_{N_2} [m^3 / m^3] = r_{N_2} + 3,76O_S = r_{N_2} + 3,76\lambda O_{\min},$$

$$V_{N_2} [m^3 / m^3] = 0,46 + 3,76 \cdot 1,42 \cdot 0,175,$$

$$V_{N_2} = 1,39 \frac{m^3}{m^3}.$$

### Zadatak 13.

Gasovito gorivo sledećeg zapreminskog sastava:  $CO=25\%$ ;  $CH_4=9\%$ ;  $C_3H_8=10\%$ ;  $CO_2=8\%$ ;  $N_2=10\%$ ;  $H_2=22\%$ ;  $H_2O=5\%$ ;  $O_2=7\%$  i  $SO_2=4\%$ , sagoreva u vazduhu. Sagorevanje se odvija u prisustvu viška vazduha od  $10\%$  u odnosu na teorijsku količinu. Odrediti minimalnu i stvarnu količinu vazduha potrebnu za sagorevanje navedenog gasovitog goriva.

### Rešenje:

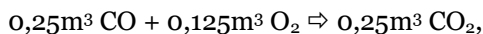
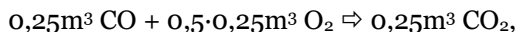
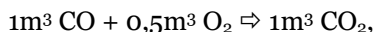
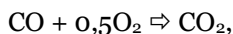
Zapreminski udeli pojedinih komponenti goriva se mogu predstaviti zapisom:

$$r_{CO} = 0,25, r_{CH_4} = 0,09, r_{C_3H_8} = 0,1, r_{CO_2} = 0,08, r_{N_2} = 0,1, r_{H_2} = 0,22, r_{H_2O} = 0,05,$$

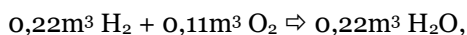
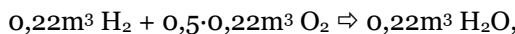
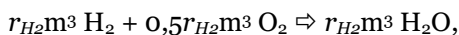
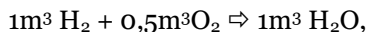
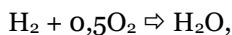
$$r_{O_2} = 0,07 \text{ i } r_{SO_2} = 0,04.$$

Sagorevanje svake od sagorivih komponenti se može prikazati jednačinama:

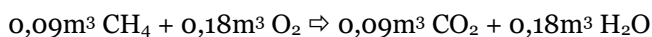
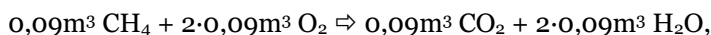
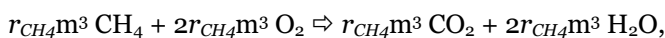
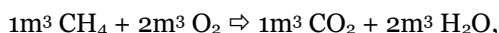
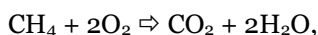
za ugljen-monoksid:



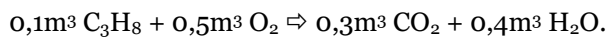
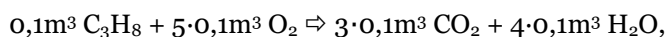
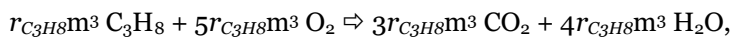
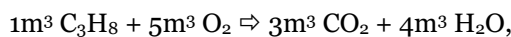
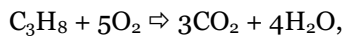
za vodonik:



za metan:



i za propan:



Ako se saberu količine kiseonika potrebne za sagorevanje svih sagorivih komponenti dobijene iz prethodnih jednačina i od njih oduzme količina kiseonika koja se već nalazi u gorivu, dobiće se minimalna teorijski potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje zadatog goriva:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,125 + 0,11 + 0,18 + 0,5 - 0,07,$$

$$O_{\min} = 0,845 \frac{m^3}{m^3}.$$

Ova vrednost se može dobiti i direktno iz formule:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,5(r_{\text{CO}} + r_{\text{H}_2}) + \Sigma(m + 0,25n)r_{\text{C}_m\text{H}_n} - r_{\text{O}_2},$$

odakle je:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,5(0,25 + 0,22) + (1 + 0,25 \cdot 4) \cdot 0,09 + (3 + 0,25 \cdot 8) \cdot 0,1 - 0,07,$$

$$O_{\min} = 0,845 \frac{m^3}{m^3}.$$

Minimalna količina vazduha potrebna za sagorevanje goriva je:

$$L_{\min} [m^3 / m^3] = \frac{O_{\min} [m^3 / m^3]}{0,21},$$

pa je:

$$L_{\min} [m^3 / m^3] = \frac{0,845}{0,21},$$

$$L_{\min} = 4,02 \frac{m^3}{m^3}.$$

Stvarna količina vazduha je:

$$L_S = \lambda L_{\min},$$

odnosno:

$$L_S = 1,1 \cdot 4,02,$$

$$L_S = 4,43 \frac{m^3}{m^3}.$$

#### Zadatak 14.

Generatorski gas ima sledeći zapreminski sastav:  $\text{CO}_2=5\%$ ;  $\text{O}_2=5\%$ ;  $\text{CH}_4=30\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=20\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}=10\%$  i  $\text{N}_2=30\%$ . Potrebno je odrediti:

- minimalnu količinu vazduha potrebnog za sagorevanje ovog gasa, u  $\text{m}^3/\text{m}^3$  i
- zapreminski i maseni sadržaj vodene pare u produktima sagorevanja, u %, za slučaj da je  $\lambda=1,1$ .

#### Rešenje:

- Najpre je potrebno odrediti minimalnu teorijski potrebnu količinu kiseonika:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,5(r_{CO} + r_{H_2}) + \Sigma(m + 0,25n)r_{CmHn} - r_{O_2},$$

odakle je:

$$O_{\min} [m^3 / m^3] = 0,5(0 + 0) + (1 + 0,25 \cdot 4) \cdot 0,03 + (2 + 0,25 \cdot 6) \cdot 0,2 + (4 + 0,25 \cdot 10) \cdot 0,1 - 0,05,$$

$$O_{\min} = 1,9 \frac{m^3}{m^3}.$$

Minimalna količina vazduha potrebna za sagorevanje ovog gasa se određuje iz relacije:

$$L_{\min} [m^3 / m^3] = \frac{O_{\min} [m^3 / m^3]}{0,21},$$

odakle je:

$$L_{\min} [m^3 / m^3] = \frac{1,9}{0,21},$$

$$L_{\min} = 9,05 \frac{m^3}{m^3}.$$

(b) Zapremine produkata sagorevanja nastale sagorevanjem 1m<sup>3</sup> goriva, izražene u m<sup>3</sup> produkata sagorevanja po 1m<sup>3</sup> goriva, tj. m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> su:

$$V_{CO_2} [m^3 / m^3] = r_{CO_2} + r_{CO} + \Sigma r_{CmHn} m,$$

$$V_{CO_2} [m^3 / m^3] = 0,05 + 0 + 0,3 \cdot 1 + 0,2 \cdot 2 + 0,1 \cdot 4,$$

$$V_{CO_2} = 1,15 \frac{m^3}{m^3},$$

$$V_{H_2O} [m^3 / m^3] = r_{H_2O} + r_{H_2} + 0,5 \Sigma r_{CmHn} n,$$

$$V_{H_2O} [m^3 / m^3] = 0 + 0 + 0,5 \cdot (0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 6 + 0,1 \cdot 10),$$

$$V_{H_2O} = 1,7 \frac{m^3}{m^3},$$

$$V_{O_2} [m^3 / m^3] = O_S - O_{\min} = (\lambda - 1) O_{\min},$$

$$V_{O_2} [m^3 / m^3] = (1,1 - 1) \cdot 1,9,$$

$$V_{O_2} = 0,19 \frac{m^3}{m^3} \text{ i}$$

$$V_{N_2} [m^3 / m^3] = r_{N_2} + 3,76 O_S = r_{N_2} + 3,76 \lambda O_{\min},$$

$$V_{N_2} [m^3 / m^3] = 0,3 + 3,76 \cdot 1,1 \cdot 1,9,$$

$$V_{N_2} = 8,16 \frac{m^3}{m^3}.$$

Zapreminski sadržaj vodene pare u produktima sagorevanja je:

$$H_2O_{(vol)} [\%vol] = \frac{V_{H_2O}}{V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2}} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)} [\%vol] = \frac{1,7}{1,15 + 1,7 + 0,19 + 8,16} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(vol)}[\%vol] = 15,2\%$$

Maseni sadržaj vodene pare u produktima sagorevanja se određuje jednačinom:

$$H_2O_{(mas)}[\%mas] = \frac{m_{H_2O}}{m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{O_2} + m_{N_2}} \cdot 100,$$

koja se, imajući u vidu relacije:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{V}{V_m},$$

odnosno:

$$m = \frac{MV}{V_m},$$

svodi na:

$$H_2O_{(mas)}[\%mas] = \frac{\frac{M_{H_2O}V_{H_2O}}{V_m}}{\frac{M_{CO_2}V_{CO_2}}{V_m} + \frac{M_{H_2O}V_{H_2O}}{V_m} + \frac{M_{O_2}V_{O_2}}{V_m} + \frac{M_{N_2}V_{N_2}}{V_m}} \cdot 100,$$

odnosno, imajući u vidu jednakost molarnih zapremina gasova:

$$H_2O_{(mas)}[\%mas] = \frac{M_{H_2O}V_{H_2O}}{M_{CO_2}V_{CO_2} + M_{H_2O}V_{H_2O} + M_{O_2}V_{O_2} + M_{N_2}V_{N_2}} \cdot 100.$$

Naravno, ovde je reč o masama i zapreminama koje se odnose na sagorevanje 1m<sup>3</sup> goriva. Odavde je:

$$H_2O_{(mas)}[\%mas] = \frac{18 \cdot 1,7}{44 \cdot 1,15 + 18 \cdot 1,7 + 32 \cdot 0,19 + 28 \cdot 8,16} \cdot 100,$$

$$H_2O_{(mas)}[\%mas] = 9,7\%.$$