

RAČUNSKI ZADATAK IZ OBLASTI SAGOREVANJA ČVRSTOG GORIVA

Oznake korišćene u tekstu:

g_C	-maseni udeo ugljenika u gorivu, bezdimenziona veličina,
C	-procentualni maseni udeo ugljenika u gorivu, % (mas), $C[\%]=g_C \cdot 100$,
g_H	-maseni udeo vodonika u gorivu,
H	-procentualni maseni udeo vodonika u gorivu, % (mas), $H[\%]=g_H \cdot 100$,
g_O	-maseni udeo kiseonika u gorivu,
O	-procentualni maseni udeo kiseonika u gorivu, % (mas), $O[\%]=g_O \cdot 100$,
g_N	-maseni udeo azota u gorivu,
N	-procentualni maseni udeo azota u gorivu, % (mas), $N[\%]=g_N \cdot 100$,
g_S	-maseni udeo sumpora u gorivu,
S	-procentualni maseni udeo sumpora u gorivu, % (mas), $S[\%]=g_S \cdot 100$,
g_A	-maseni udeo mineralnih primesa u gorivu,
A	-procentualni maseni udeo mineralnih primesa u gorivu, % (mas), $A[\%]=g_A \cdot 100$,
g_{WH}	-maseni udeo higroskopne vlage u gorivu,
W_H	-procentualni maseni udeo higroskopne vlage u gorivu, % (mas), $W_H[\%]=g_{WH} \cdot 100$,
g_{WG}	-maseni udeo grube vlage u gorivu,
W_G	-procentualni maseni udeo grube vlage u gorivu, % (mas), $W_G[\%]=g_{WG} \cdot 100$,
H_s	-gornja toplotna moć, kJ/kg,
H_i	-donja toplotna moć, kJ/kg,
O_{min}	-minimalna količina kiseonika neophodna za potpuno sagorevanje, kg/kg, m ³ /kg,
L_{min}	-minimalna količina vazduha neophodna za potpuno sagorevanje, kg/kg, m ³ /kg,
L_S	-stvarna količina vazduha utrošena na sagorevanje, kg/kg, m ³ /kg,
λ	-koeficijent viška vazduha,
V_{CO_2}	-zapremina ugljen-dioksida, m ³ /kg,
V_{H_2O}	-zapremina vode, m ³ /kg,
V_{SO_2}	-zapremina sumpor-dioksida, m ³ /kg,
V_{N_2}	-zapremina azota, m ³ /kg,
V_{O_2}	-zapremina kiseonika, m ³ /kg,
V_V	-zapremina vlažnih produkata sagorevanja, m ³ /kg,
V_S	-zapremina suvih produkata sagorevanja, m ³ /kg,
CO_{2V}	-zapreminski udeo CO ₂ u vlažnim produktima sagorevanja, % (vol),
H_2O_V	-zapreminski udeo H ₂ O u vlažnim produktima sagorevanja, % (vol),
SO_{2V}	-zapreminski udeo SO ₂ u vlažnim produktima sagorevanja, % (vol),
N_{2V}	-zapreminski udeo N ₂ u vlažnim produktima sagorevanja, % (vol) i
O_{2V}	-zapreminski udeo O ₂ u vlažnim produktima sagorevanja, % (vol).

Značenja nekih indeksa:

- (*r*) -maseni udeo u radnoj masi goriva,
- (*a*) -maseni udeo u analitičkoj masi goriva,
- (*g*) -maseni udeo u čistoj gorivoj masi goriva i
- (*s*) -maseni udeo u suvoj masi goriva.

1. Uslovne mase goriva

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

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

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

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

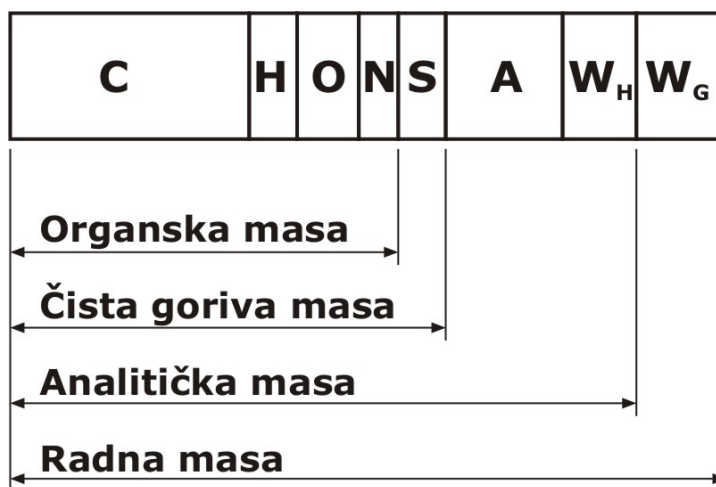
$$C_{(a)} + H_{(a)} + O_{(a)} + N_{(a)} + S_{(a)} + A_{(a)} + W_{H(a)} = 100 \% .$$

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

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

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

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

**Slika 1**

Uslovne mase goriva

Preračunavanja sa jedne uslovne mase na drugu vrše se odgovarajućim izrazima. U Tabeli 1 su dati izrazi za preračunavanja analitičke mase na radnu, gorivu i organsku. Za jednoznačno određivanje procentualnog masenog sastava radne mase na osnovu analitičke mase goriva, potrebno je poznavati i maseni udeo grube vlage u radnoj masi goriva, $W_{G(r)}$.

Tabela 1. Preračunavanje analitičke na ostale uslovne mase

	Radna masa		Čista goriva masa	Organska masa
C	$C_{(r)} = C_{(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100}$	$C_{(a)}$	$C_{(g)} = C_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)})}$	$C_{(o)} = C_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)} + S_{(a)})}$
H	$H_{(r)} = H_{(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100}$	$H_{(a)}$	$H_{(g)} = H_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)})}$	$H_{(o)} = H_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)} + S_{(a)})}$
O	$O_{(r)} = O_{(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100}$	$O_{(a)}$	$O_{(g)} = O_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)})}$	$O_{(o)} = O_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)} + S_{(a)})}$
N	$N_{(r)} = N_{(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100}$	$N_{(a)}$	$N_{(g)} = N_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)})}$	$N_{(o)} = N_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)} + S_{(a)})}$
S	$S_{(r)} = S_{(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100}$	$S_{(a)}$	$S_{(g)} = S_{(a)} \cdot \frac{100}{100 - (W_{H(a)} + A_{(a)})}$	
A	$A_{(r)} = A_{(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100}$	$A_{(a)}$		
W_H	$W_{H(r)} = W_{H(a)} \cdot \frac{100 - W_{G(r)}}{100}$	$W_{H(a)}$		
W_G	$W_{G(r)}$			

2. Toplotna moć goriva

Toplotna moć goriva je odnos nastale količine toplote pri potpunom sagorevanju i količine goriva čijim je sagorevanjem ta toplota dobijena.

Toplotne moći (gornju i donju) analitičke mase čvrstog goriva u kJ/kg moguće je odrediti analitičkim putem, ako je poznat elementarni sastav goriva, pomoću izraza:

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

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

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

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

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

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

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

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

Rezultati se predstavljaju tabelarno:

Tabela 2. Toplotne moći goriva

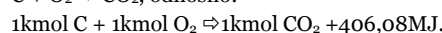
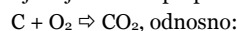
Toplotna moć	Radna masa	Analitička masa	Čista goriva masa
H_s [kJ/kg]			
H_i [kJ/kg]			

3. Minimalna količina kiseonika i vazduha

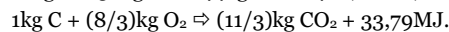
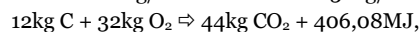
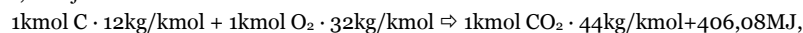
Minimalno potrebna količina kiseonika predstavlja teorijski neophodnu količinu kiseonika za potpuno sagorevanje svih gorivih elemenata goriva. Kod čvrstih goriva se može izražavati u kg kiseonika po 1kg goriva ili u m³ kiseonika po 1kg goriva.

Ova veličina se računa na osnovu poznatog elementarnog sastava goriva i minimalno potrebnih količina kiseonika za sagorevanje svakog gorivog elementa: ugljenika, vodonika i sumpora, dobijenih iz stehiometrijskih jednačina sagorevanja. Od dobijene potrebne količine kiseonika potrebno je oduzeti količinu kiseonika koja ulazi u sastav goriva, jer se i taj kiseonik koristi za sagorevanje.

Količinu kiseonika neophodnu za potpuno sagorevanje ugljenika dobijamo iz stehiomertijske jednačine potpunog sagorevanja ugljenika:

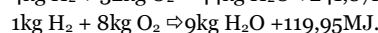
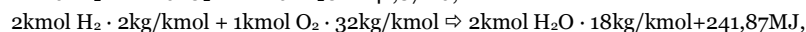
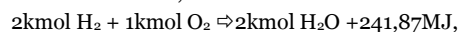


Imajući u vidu da su molarne mase molekula ugljenika, kiseonika i ugljen-dioksida redom: 12, 32 i 44kg/kmol, dobija se:



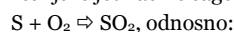
Prema tome, za potpuno sagorevanje 1kg ugljenika neophodno je 8/3kg kiseonika. Pri tome nastane 11/3kg udgljen-dioksida i oslobodi se 33,79MJ toplotne energije.

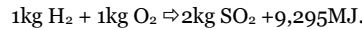
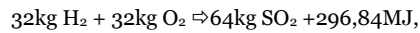
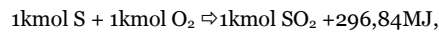
Na sličan način se dobija količina kiseonika neophodna za sagorevanje 1kg vodonika:



Znači, za sagorevanje 1kg vodonika neophodno je 8kg kiseonika. Pri tome nastaje 9kg vode i oslobodi se 119,95MJ toplotne energije.

Potpuno analogno se dobija količina kiseonika potrebna za sagorevanje sumpora, polazeći od stehiometrijske jednačine sagorevanje sumpora:





Za sagorevanje 1kg sumpora utroši se 1kg kiseonika, nastane 2kg sumpor-dioksida i oslobodi se 9,295MJ toplotne energije.

Minimalno potrebna količina kiseonika za sagorevanje goriva, data u kg kiseonika po 1kg goriva, može se odrediti pomoću izraza:

$$O_{\min} [\text{kg} / \text{kg}] = \frac{8}{3} \cdot g_{C(a)} + 8 \cdot g_{H(a)} + g_{S(a)} - g_{O(a)}.$$

Uvodeći Molierovu konstantu, definisanu izrazom:

$$\sigma = 1 + \frac{3 \cdot g_{H(a)} - \frac{3}{8} \cdot (g_{O(a)} - g_{S(a)})}{g_{C(a)}},$$

dobija se:

$$O_{\min} [\text{kg} / \text{kg}] = 2,67 \cdot \sigma \cdot g_{C(a)}.$$

Minimalno potrebna količina kiseonika za sagorevanje, data u m³ kiseonika po 1kg goriva, može se odrediti iz izraza:

$$O_{\min} [\text{m}^3 / \text{kg}] = 1,867 \cdot \sigma \cdot g_{C(a)}.$$

Znajući da je maseni udeo kiseonika u vazduhu 23,2%, a zapreminski udeo oko 21%, može se odrediti minimalna količina vazduha neophodna za potpuno sagorevanje (iz koje se dobija neophodna količina kiseonika):

$$L_{\min} [\text{kg} / \text{kg}] = \frac{O_{\min} [\text{kg} / \text{kg}]}{0,232} \text{ i}$$

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

Ovako teorijski određena, minimalna potrebna količina vazduha za sagorevanje često u praksi nije dovoljna da se obezbedi potpuno sagorevanje. Zato je potrebno dovesti nešto veću količinu vazduha, koju nazivamo *stvarnom količinom vazduha*, L_S . Odnos stvarne i minimalne potrebne količine vazduha se naziva *koeficijent viška vazduha*, λ (bezdimenziona veličina). Često je u upotrebi relacija:

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

4. Zapremina produkata sagorevanja

U uslovima potpunog sagorevanja, kada je vrednost koeficijenta viška vazduha veća od 1, u opštem slučaju, u produktima sagorevanja se nalaze: ugljen-dioksid (CO₂), voda (H₂O), sumpor-dioksid (SO₂), kao i azot (N₂) iz vazduha i kiseonik (O₂) ako je λ veće od 1. U produkte sagorevanja spada i čvrst nesagorivi ostatak-pepeo.

Zapremine produkata sagorevanja se izračunavaju na osnovu poznatog elementarnog sastava goriva i stehiometrijskih jednačina sagorevanja. Izražavaju se u m³ po 1kg goriva. Izrazi za njihovo izračunavanje u m³/kg su:

$$V_{CO_2} = 1,867 \cdot g_{C(a)},$$

$$V_{H_2O} = 11,2 \cdot g_{H(a)} + 1,24 \cdot g_{WH(a)},$$

$$V_{SO_2} = 0,7 \cdot g_{S(a)},$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L_S + 0,8 \cdot g_{N(a)} \text{ i}$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (L_S - L_{\min}) = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\min}.$$

Zapremina vlažnih produkata sagorevanja je jednaka:

$$V_V = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2},$$

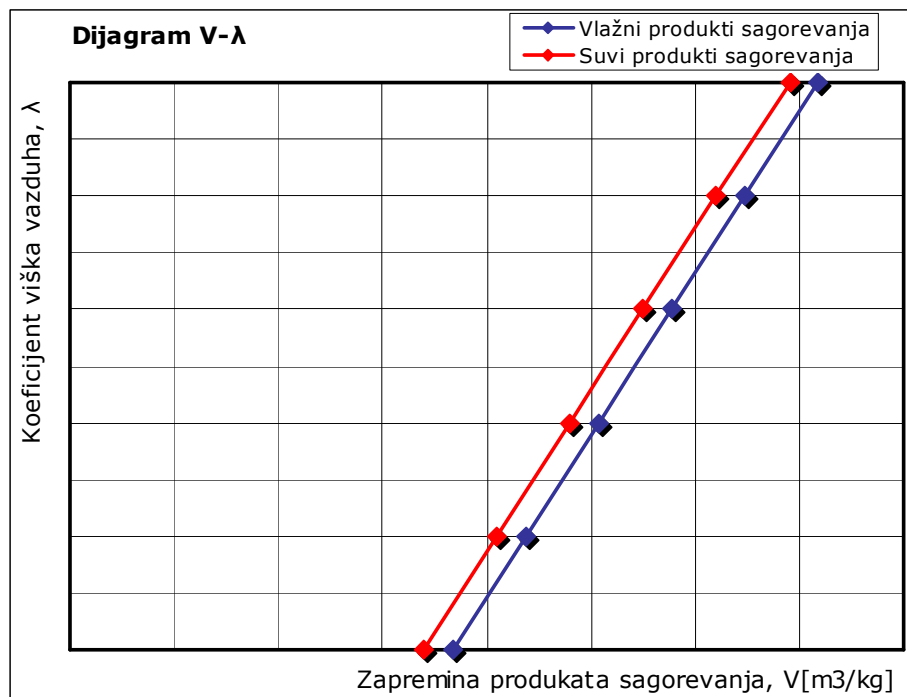
a zapremina suvih produkata sagorevanja:

$$V_S = V_V - V_{H_2O} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}.$$

Očigledno je da se zapremine vlažnih i suvih produkata sagorevanja menjaju linearno sa promenom koeficijenta viška vazduha. Zavisnost zapremine vlažnih i suvih produkata sagorevanja od λ prikazuje se tabelarno ili grafički:

Tabela 3. Zapremina produkata sagorevanja u zavisnosti od λ

λ	L_S [m ³ /kg]	V_V [m ³ /kg]	V_S [m ³ /kg]
1,00			
1,20			
1,40			
1,60			
1,80			
2,00			



Slika 2

Dijagram V- λ

5. Zapreminski sastav vlažnih produkata sagorevanja

Učešće pojedinih komponentata u ukupnoj količini produkata sagorevanja izračunavamo jednostavno: odnosom zapremine odgovarajuće komponenta i ukupne zapremine vlažnih produkata sagorevanja. Rezultati se dobijaju u zapreminskim procentima, %vol.

$$CO_{2V} = \frac{V_{CO_2}}{V_V} \cdot 100 ,$$

$$H_2O_V = \frac{V_{H_2O}}{V_V} \cdot 100 ,$$

$$SO_{2V} = \frac{V_{SO_2}}{V_V} \cdot 100 ,$$

$$N_{2V} = \frac{V_{N_2}}{V_V} \cdot 100 \text{ i}$$

$$O_{2V} = \frac{V_{O_2}}{V_V} \cdot 100 .$$

Rezultati zavise od koeficijenta viška vazduha i prikazuju se tabelarno:

Tabela 4. Zapreminski sastav produkata sagorevanja

λ	CO_{2V} [%vol]	H_2O_V [%vol]	SO_{2V} [%vol]	N_{2V} [%vol]	O_{2V} [%vol]
1,00					
1,20					
1,40					
1,60					
1,80					
2,00					