



# Сагоревање Б

Предавање 3



## Сагоревање - дефиниције

- Сагоревањем се добија највећи енергије у свету.
  - Постоје различите дефиниције процеса сагоревања:
    - Сагоревање представља сложен физичко-хемијски процес оксидације горива праћен интензивним ослобађањем топлоте,
    - Сагоревање је физичко-хемијски процес при чему молекули различитих супстанција међусобно размењују електроне (из спољне љуске) уз укупни (изразито) позитивни топлотни ефекат,
    - Сагоревање представља процес брзе оксидације праћен ослобађањем топлоте или топлотом и пламеном или спори процес оксидације праћен релативно малом количином ослобођене топлоте и без пламена.
  - Сагоревањем се хемијска енергија везана у гориву трансформише у топлотну енергију, односно механичку енергију.
-

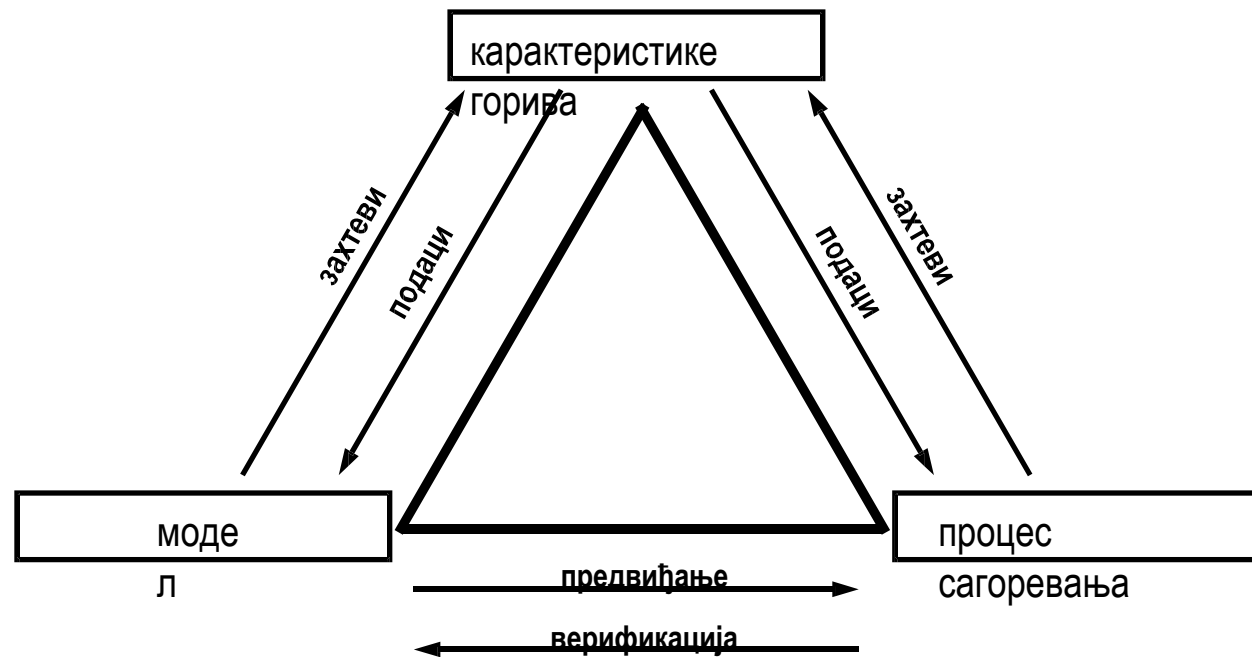


## Сагоревање – примери примене

- пећи и котлови (чврста, течна и гасовита горива)
  - мотори са унутрашњим сагоревањем
  - гасне турбине и млазни мотори
  - ракетни мотори
  - оружје и експлозиви
  - синтеза материјала пламеном (наноматеријали)
  - хемијски процеси
  - обликовање материјала
  - пожари и противпожарна заштита.
-



# Сагоревање





## Сагоревање – услови за започињање и одвијање

- Одговарајући састав гориве смеше – одговарајући однос горива и ваздуха у смеши.
  - Довољно висока температура гориве смеше да се иницира и успостави стабилан процес сагоревања.
-



# Сагоревање

- Комплексан процес који обухвата
    - Физичке процесе
      - динамика флуида, пренос топлоте и супстанције
    - Хемијске процесе
      - термодинамика и хемијска кинетика
  - Практична примена сагоревања обухвата познавање и карактеристика горива и одређених области машинства.
-



# Сагоревање

- Термодинамика
    - стехиометрија
    - карактеристике гасова и смеша гасова
    - топлота формирања
    - топлотни ефекат хемијских реакција
    - равнотежа (термодинамика изучава системе у равнотежи или када су одступања од равнотеже мала, што је у условима сагоревања најчешће задовољено)
    - калориметарска температура сагоревања.
-



# Сагоревање

- Пренос топлоте
    - кондукција
    - конвекција
    - радијација
  - Пренос супстанције
    - дифузија
    - адсорпција
  - Динамика флуида
    - ламинарно струјање
    - турбулентно струјање
    - вискозност
    - аеродинамика сагоревања
  - Хемијска кинетика
    - брзина хемијских реакција
    - хемијска равнотежа.
-





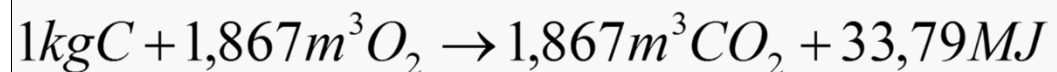
## Сагоревање - закони

- Закон о одржању маса – при хемијским и физичким променама количина масе (материје) се не мења.
  - Закон о одржању енергије (I закон термодинамике) – енергија се не може уништити нити добити, енергија прелази из једног у друго стање.
-



## Сагоревање - закони

- Hess-ов закон – количина топлоте која се ослободи при некој хемијској реакцији не зависи од међупроцеса кроз које реакција пролази, већ зависи само од почетног и крајњег стања
- Закон простих пропорција – масени односи у којима се елементи једине се не мењају. Два елемента се једине по законима валентности: један атом једног елемента једини се са једним или више атома другог елемента. Како сваки елемент има своју масу, сједињавање два елемента је у одређеним и сталним масеним односима.





## Сагоревање - закони

- Закон умножених пропорција – ако се два елемента могу јединити у различитим односима (један атом једног елемента може се спајати са једним, два или више атома другог елемента), онда се једна иста количина једног елемента може јединити са истом или два или више пута већом количином другог елемента (пример  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6, \dots$ ).
-



## Сагоревање - закони

- Gay-Lussac-ов закон (закон о понашању идеалних гасова) – елементи у гасовитом стању једине се у простим запреминским односима. Запремина новонасталог гаса стоји у простом односу према запремини гасова од којих је нови гас настао.
- Avogadro-ов закон – једнаке запремине идеалних гасова на истој температури, под истим притиском садрже исти број молекула

1 mol гаса  $\rightarrow$  22,4 dm<sup>3</sup> гаса  $\rightarrow$  6,022 $\times$ 10<sup>23</sup> молекула гаса

---



## Сагоревање - закони

- Dalton-ов закон – укупни притисак смеше гасова једнак је збиру парцијалних притисака компоненти смеше.
  - Amagat-ов закон – Укупна запремина смеше гасова једнака је збиру запремина које би заузимала свака компонента смеше под истим условима притиска и температуре који владају у смеши.
-



## Сагоревање - закони

- Lavoize-Laplace-ов закон – енергија коју је потребно довести да би се молекули разградили на атоме, једнака је енергији која се добије када се исти атоми поново вежу у исти молекул.
-



## Термодинамички основи процеса сагоревања

- Екстензивне величине стања (зависе од масе или количине супстанције у систему)
    - $V$
    - $U$
  - Интензивне величине стања (не зависе од масе или количине супстанције у систему)
    - $p$
    - $T$
-



# Термодинамички основи процеса сагоревања

- 1 kmol садржи  $6,023 \cdot 10^{23}$  молекула (Avogadro-ов број)

- Број молова

$$n_i = \frac{m_i}{M_i}$$

- Молски удео

$$r_i = \frac{n_i}{\sum_1^n n_i} = \frac{V_i}{\sum_1^n V_i}$$

- Масени удео

$$g_i = \frac{m_i}{\sum_1^n m_i}$$





# Термодинамички основи процеса сагоревања

- Густина

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

- Концентрација

$$c_i = \frac{n_i}{V} \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \right]$$



# Термодинамички основи процеса сагоревања

- Једначина стања идеалног гаса

$$pV = nRT$$

- Где је

- $p$  - притисак
- $T$  - температура
- $R$  – универзална гасна константа ( $R=8,314 \text{ J/molK}$ )



# Термодинамички основи процеса сагоревања

- I закон термодинамике

$$\delta Q = dU + pdV$$

$$\delta Q = dH - Vdp$$

- У системима где се одвијају хемијске реакције, унутрашња енергија има шире значење. Унутрашња енергија материје дефинише се као збир кинетичке (транслаторна, ротациона и енергија осцилација) и потенцијалне енергије молекула.



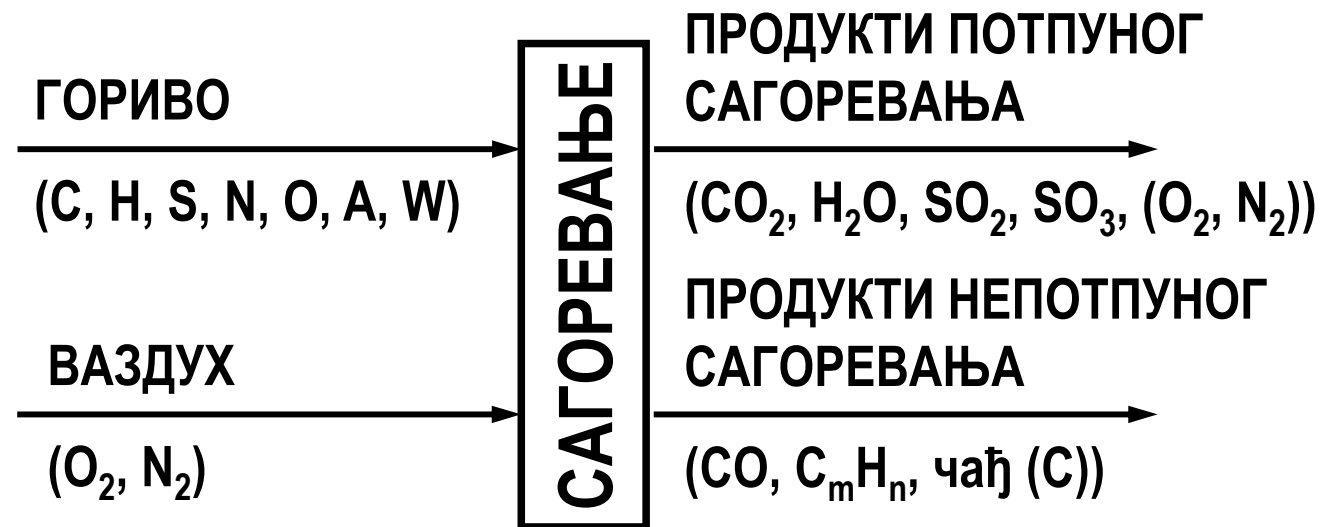
## Сагоревање

- Сагоревање - **сложен физичко-хемијски процес оксидације горива праћен интензивним ослобађањем топлоте.**
- Током процеса сагоревања добијају се продукти који се могу одредити помоћу једноставних хемијских једначина – **стехиометријске једначине.**



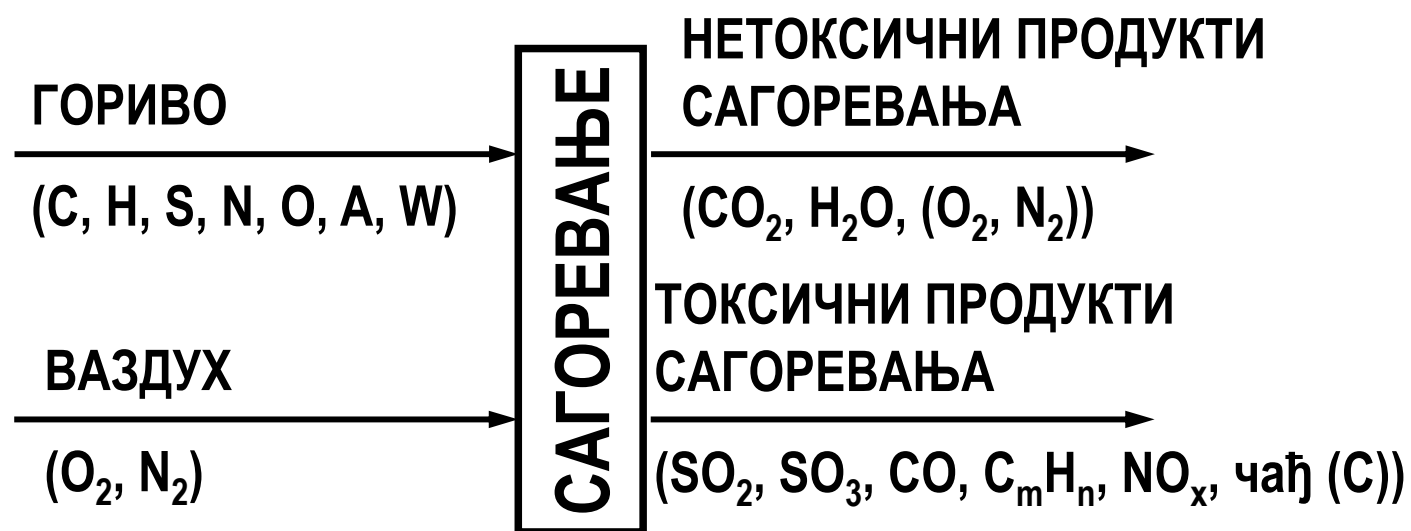


## Продукти сагоревања – класификација по критеријуму потпуности сагоревања





## Продукти сагоревања – класификација по критеријуму ТОКСИЧНОСТИ



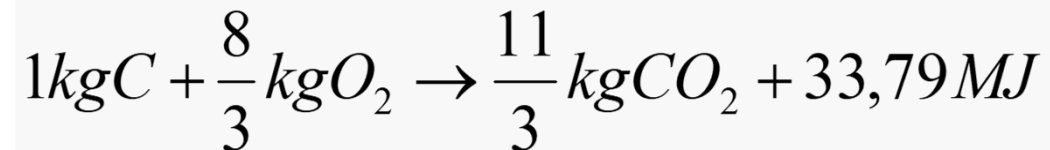
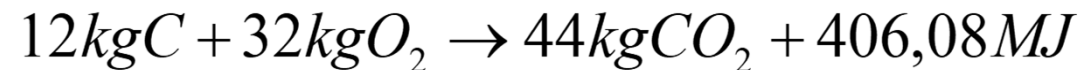
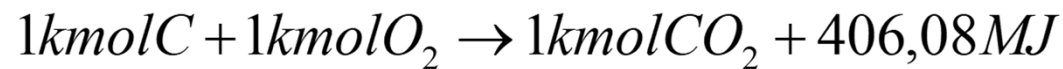
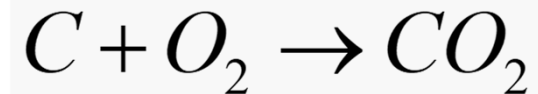


## Стехиометријске једначине дефинишу

- међусобне односе у којима се једине угљеник, водоник и сумпор са кисеоником
- количину ваздуха која је потребна за потпуно сагоревање
- количину продуката сагоревања која настаје у процесу
- количину топлоте која се током процеса ослобађа.



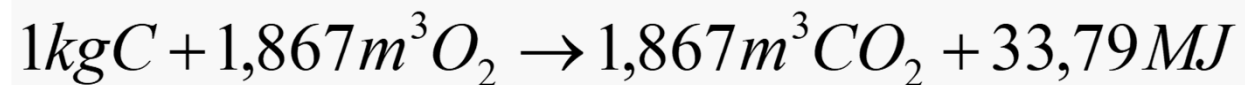
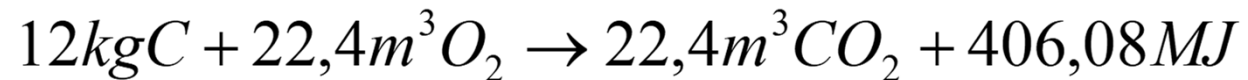
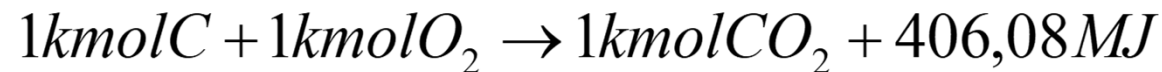
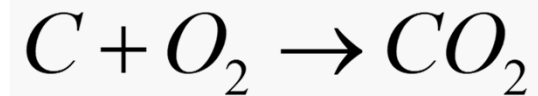
## Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника





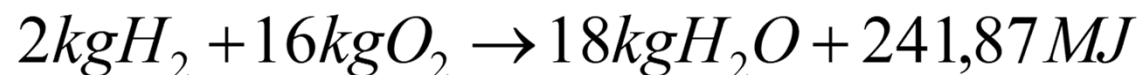
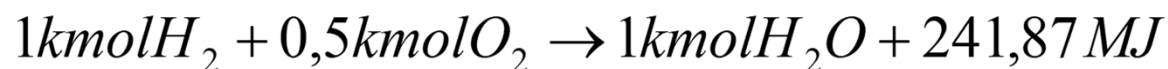
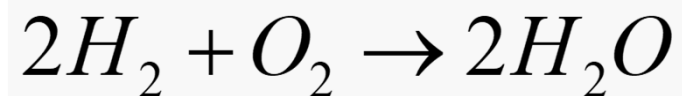


## Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника



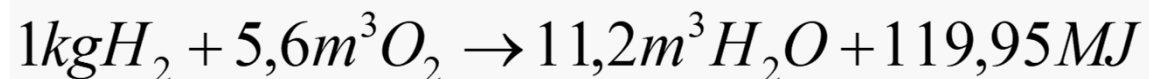
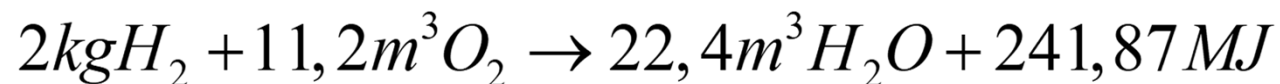
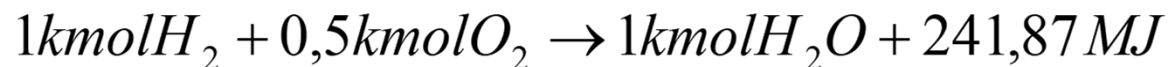
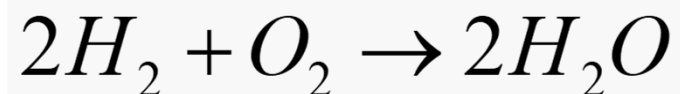


## Стехиометријска једначина сагоревања водоника



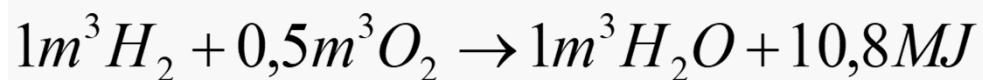
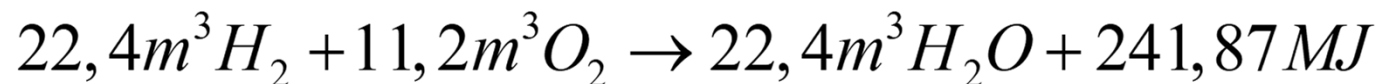
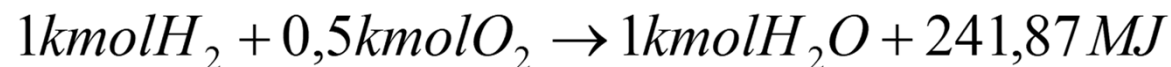
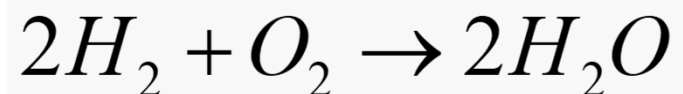


## Стехиометријска једначина сагоревања водоника



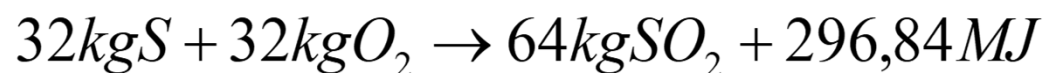
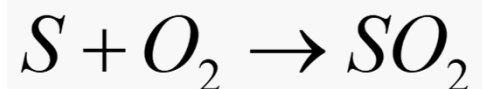


## Стехиометријска једначина сагоревања водоника



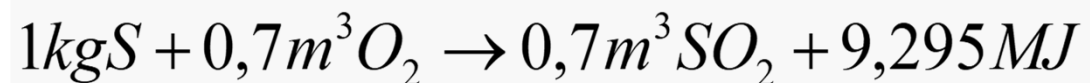
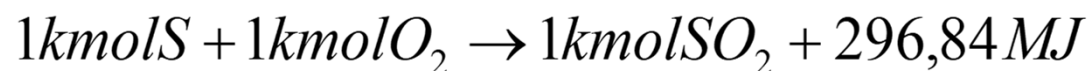
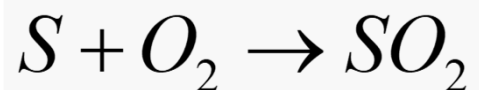


## Стехиометријска једначина сагоревања сумпора



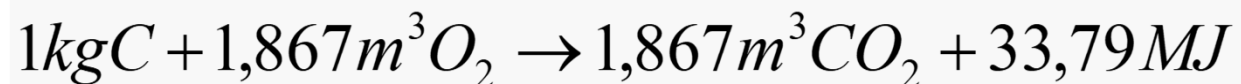
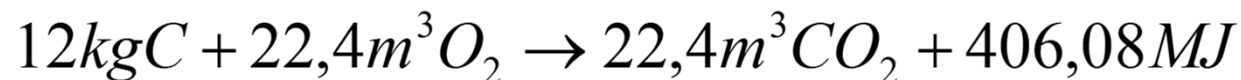
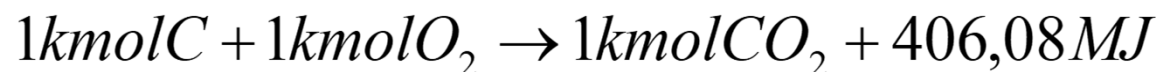
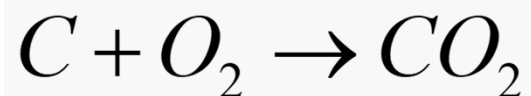


## Стехиометријска једначина сагоревања сумпора



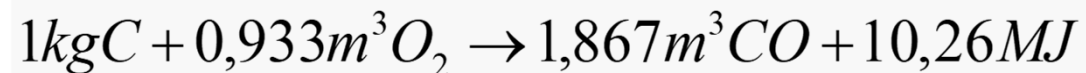
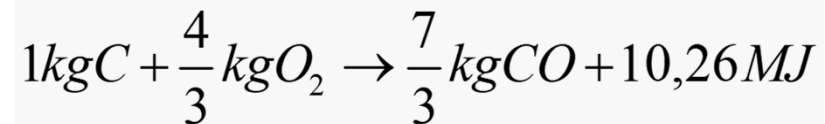
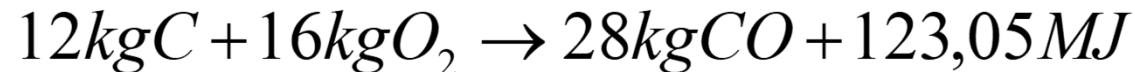
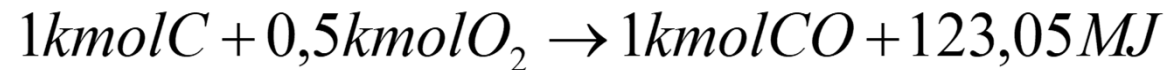
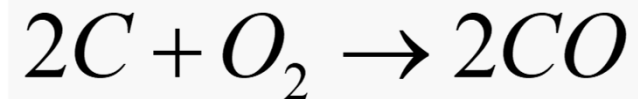


## Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника





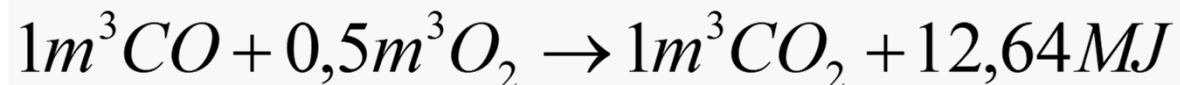
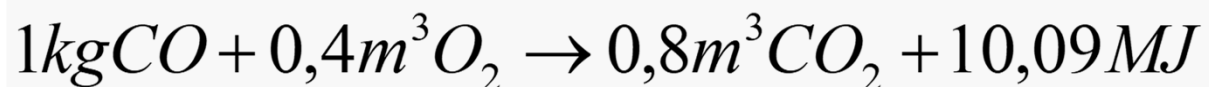
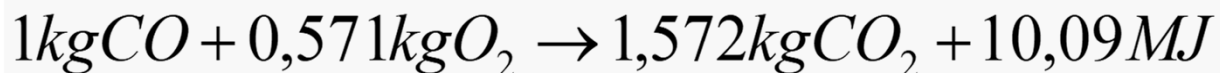
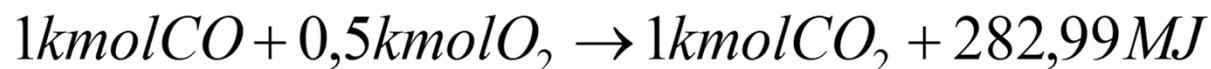
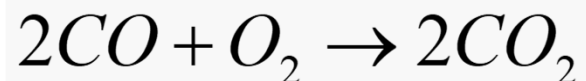
## Стехиометријска једначина сагоревања угљеника у угљен моноксид







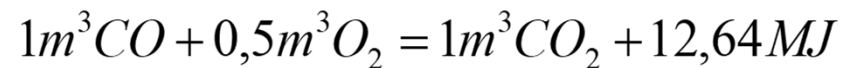
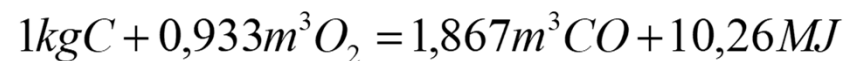
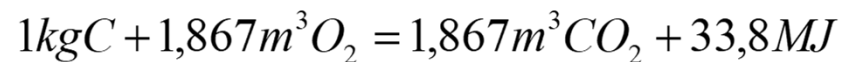
## Стехиометријска једначина сагоревања угљен моноксид у угљен диоксид





## Хесов закон

- Количина топлоте која се добије или утроши током одређене термохемијске реакције не зависи од пута одвијања реакције, већ само од почетног и крајњег стања.



$$10,26 + 1,867 \cdot 12,64 = 33,8\text{MJ}$$



## Теоријска количина кисеоника за потпуно сагоревање

$$O_{\min} (kg / kg) = \frac{8}{3} g_C + 8g_H + g_S - g_O$$

$$O_{\min} (m^3 / kg) = 1,867 \cdot g_C + 5,6 \cdot g_H + 0,7 \cdot g_S - 0,7 \cdot g_O$$



## Одређивање теоријске количине ваздуха

$$L_{\min}(kg / kg) = \frac{O_{\min}(kg / kg)}{0,23}$$

$$L_{\min}(m^3 / kg) = \frac{O_{\min}(m^3 / kg)}{0,21}$$

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



## Стварна количина ваздуха и коефицијент вишка ваздуха

- Стварна количина ваздуха

$$L = \lambda \cdot L_{\min}$$

- Коефицијент вишка ваздуха
  - $\lambda > 1$             сиромашна смеша
  - $\lambda < 1$             богата смеша



## Количина продукта сагоревања

$$V_{CO_2} (m^3 / kg) = 1,867 \cdot g_C$$

$$V_{SO_2} (m^3 / kg) = 0,7 \cdot g_S$$

$$V_{H_2O} (m^3 / kg) = 11,2 \cdot g_H + 1,24 (g_W + g_{W_1})$$

$$V_{O_2} (m^3 / kg) = 0,21 (\lambda - 1) L_{\min}$$

$$V_{N_2} (m^3 / kg) = 0,8 \cdot g_N + 0,79 L$$

$$V_v (m^3 / kg) = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2}$$

$$V_s (m^3 / kg) = V_v - V_{H_2O} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}$$



## Састав продуката сагоревања

$$CO_{2v} (\%v/v) = \frac{V_{CO_2}}{V_v} 100$$

$$CO_{2s} (\%v/v) = \frac{V_{CO_2}}{V_s} 100$$

$$SO_{2v} (\%v/v) = \frac{V_{SO_2}}{V_v} 100$$

$$SO_{2s} (\%v/v) = \frac{V_{SO_2}}{V_s} 100$$

$$H_2O_v (\%v/v) = \frac{V_{H_2O}}{V_v} 100$$

$$O_{2v} (\%v/v) = \frac{V_{O_2}}{V_v} 100$$

$$O_{2s} (\%v/v) = \frac{V_{O_2}}{V_s} 100$$

$$N_{2v} (\%v/v) = \frac{V_{N_2}}{V_v} 100$$

$$N_{2s} (\%v/v) = \frac{V_{N_2}}{V_s} 100$$



## Температура сагоревања

- Температура коју имају гасовити продукти, као резултат загревања топлотом која је настала сагоревањем горива
- Пропорционална је тоplotној моћи горива
- Обрнуто пропорционална запремини продуката сагоревања и њиховом тоplotном капацитету.





## Калориметарска температура сагоревања

- Температура сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, при чему не долази до топлотних губитака насталих дисоцијацијом продуката сагоревања на повишеним температурама и услед размене топлоте са околином

$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}}$$



## Теоријска температура сагоревања

- Температура сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, при чему се узимају у обзир топлотни губици настали дисоцијацијом продуката сагоревања на повишеним температурама , а не узимају се у обзир губици услед размене топлоте са околином

$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G - Q_d}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}}$$



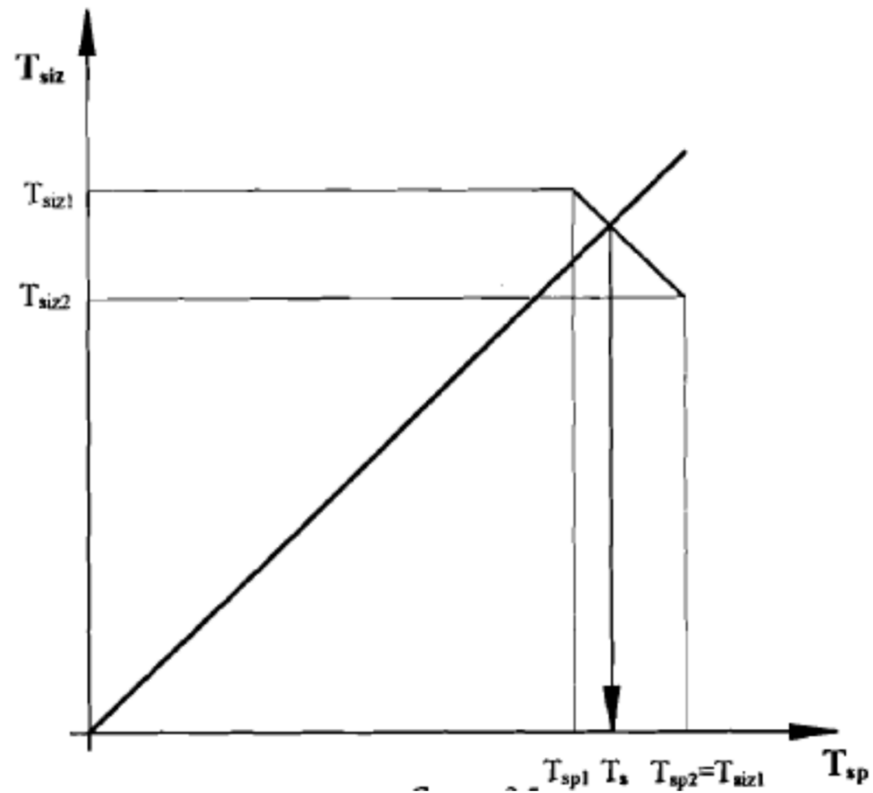
## Стварна температура сагоревања

- Температура сагоревања коју имају продукти сагоревања при потпуном сагоревању, при чему се узимају у обзир топлотни губици настали дисоцијацијом продуката сагоревања на повишеним температурама и услед размене топлоте са ОКОЛИНОМ

$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G - Q_d - Q_{tg}}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}}$$

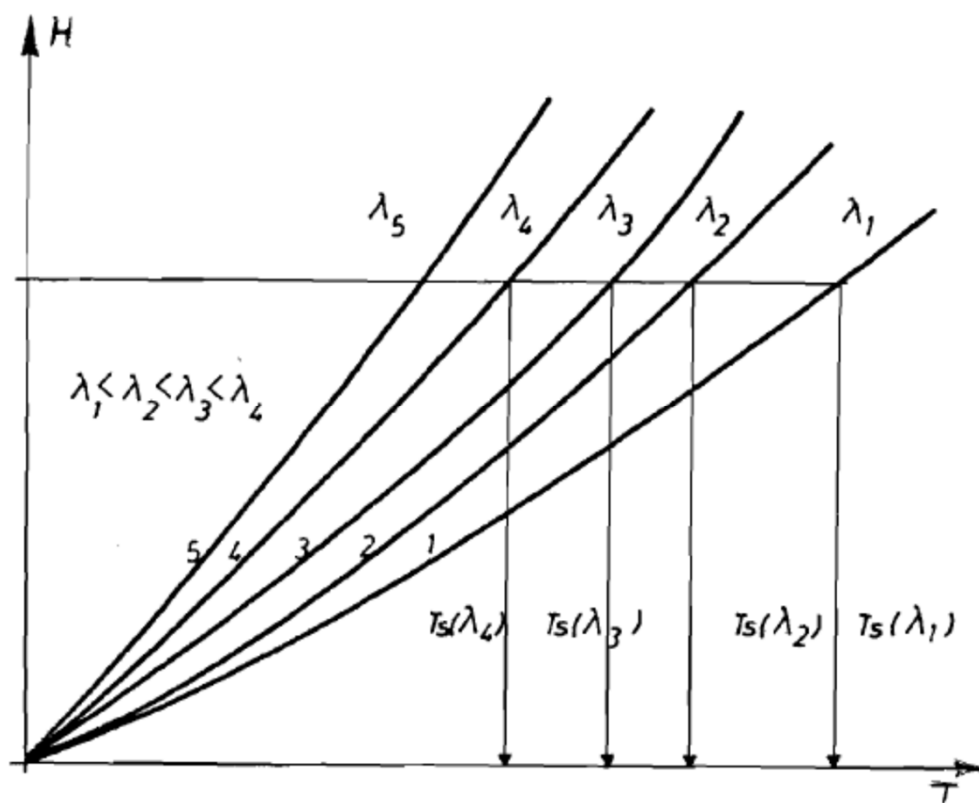


## Одређивање температуре сагоревања



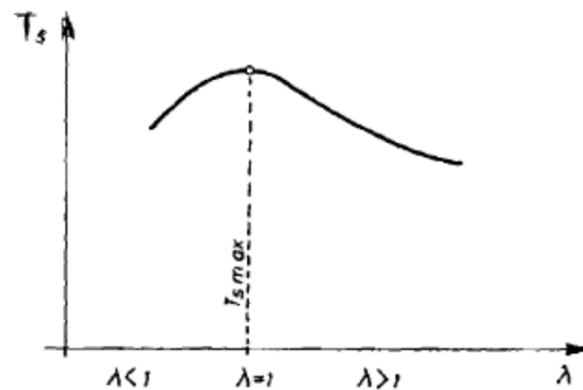


## Одређивање температуре сагоревања





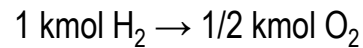
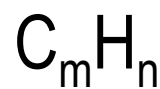
# Температура сагоревања





# Теоријска количина кисеоника за потпуно сагоревање

$n$  атома водоника  $\rightarrow n/2$  молекула водоника



$$O_{\min} (\text{kmol} / \text{kmol}) = m + \frac{n}{4}$$

$$O_{\min} (\text{kmol} / \text{kmol}) = m + \frac{n}{4} - \frac{o}{2}$$

$$O_{\min} (m^3 / kg) = \frac{22,4 \left( m + \frac{n}{4} \right)}{12m + n}$$

$$O_{\min} (m^3 / kg) = \frac{22,4 \left( m + \frac{n}{4} - \frac{o}{2} \right)}{12m + n + 16o}$$

$$O_{\min} (kg / kg) = \frac{32 \left( m + \frac{n}{4} \right)}{12m + n}$$

$$O_{\min} (kg / kg) = \frac{32 \left( m + \frac{n}{4} - \frac{o}{2} \right)}{12m + n + 16o}$$



## Количина продукта сагоревања

За горива приказана у облику:



$$V_{CO_2} (m^3 / kg) = \frac{22,4m}{12m + n}$$

$$V_{H_2O} (m^3 / kg) = \frac{11,2n}{12m + n}$$

За гасовита горива:

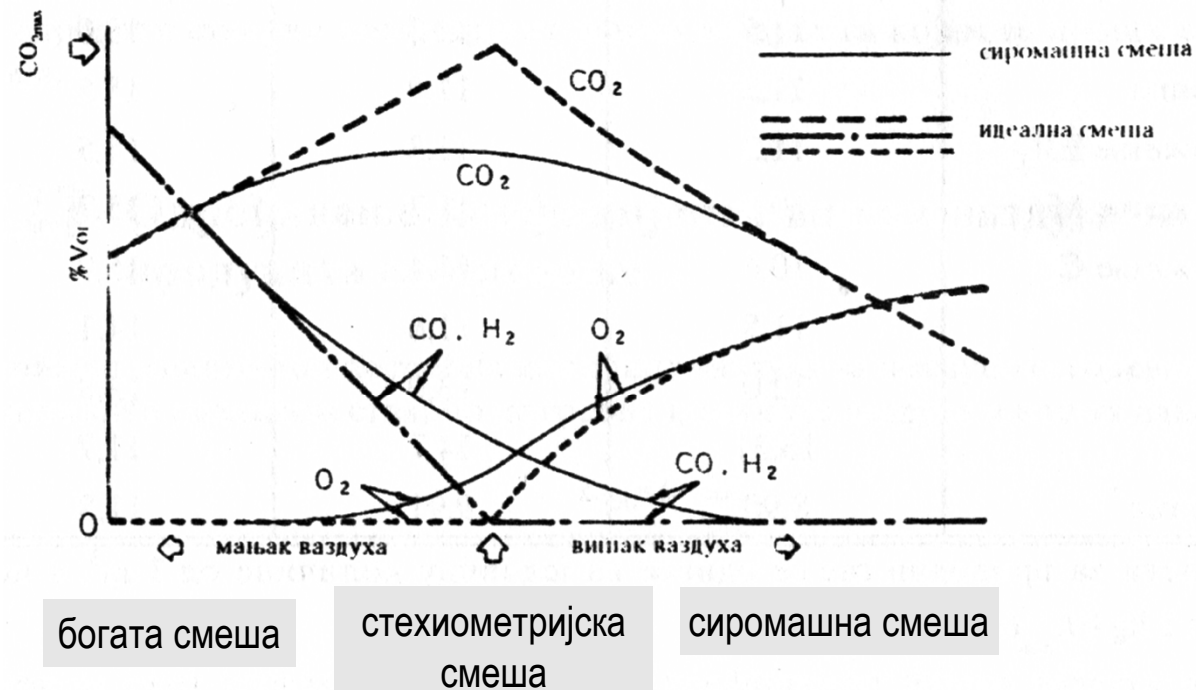
$$V_{CO_2} (m^3 / m^3) = r_{CO} + r_{CO_2} + \sum r_i \cdot m_i$$

$$V_{H_2O} (m^3 / m^3) = r_{H_2} + r_{H_2O} + \frac{1}{2} \sum r_i \cdot n_i$$





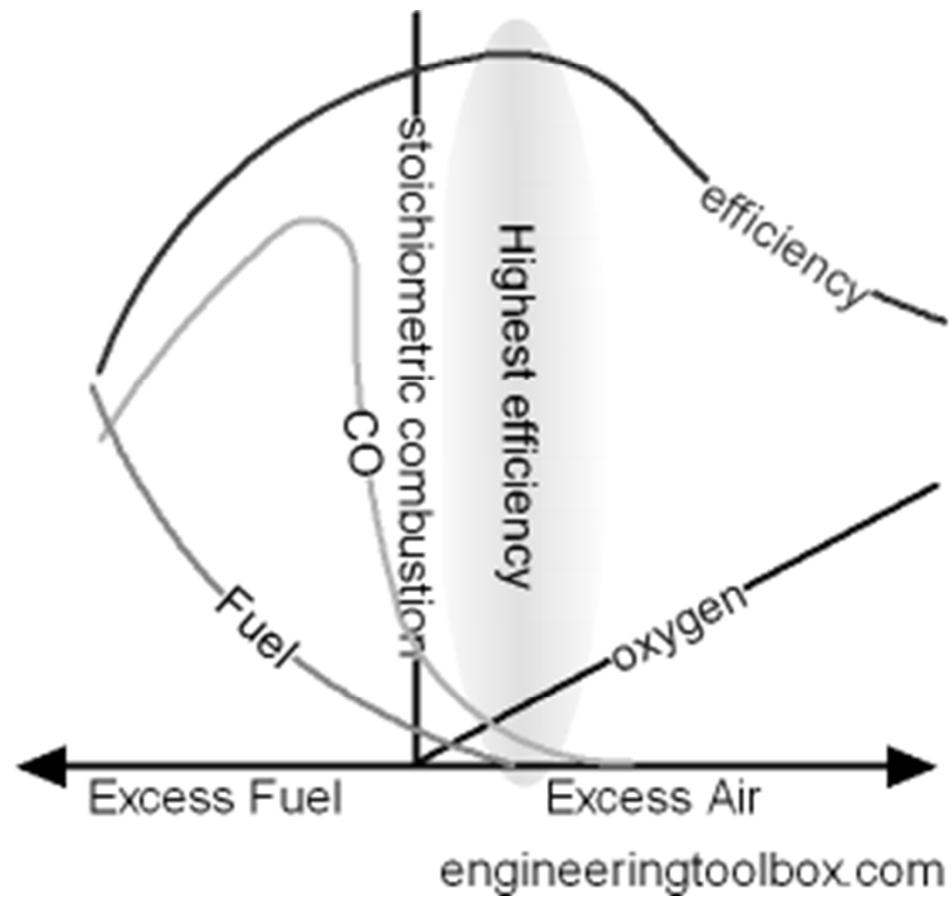
# Одређивање коефицијента вишка ваздуха из састава продукта сагоревања



Слика 3.4: Састав теоријских и стварних продуката сагоревања



# Ефикасност процеса сагоревања





## Коефицијент вишка ваздуха

Полазимо од дефиниције коефицијента вишка ваздуха:

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}} = \frac{L}{L - \Delta L} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}}$$



## Коефицијент вишка ваздуха

$$V_{O_2} = \frac{O_2}{100} V_s$$

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

$$\Delta L = \frac{O_2}{100} V_s \frac{100}{21} = \frac{O_2}{21} V_s$$

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}} = \frac{L}{L - \Delta L} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}}$$



## Коефицијент вишка ваздуха

$$V_{N_2} = \frac{N_2}{100} V_s$$

$$V_{N_2} = \frac{N_2}{100} V_s = 0,79 \cdot L$$

$$L = \frac{N_2}{100} V_s \frac{100}{79} = \frac{N_2}{79} V_s$$

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}} = \frac{L}{L - \Delta L} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}}$$



## Коефицијент вишка ваздуха

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}} = \frac{L - \Delta L}{L_{\min}} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}}$$

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}} = \frac{L - \Delta L}{L_{\min}} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}} = \frac{1}{1 - \frac{\frac{O_2}{21} V_s}{\frac{N_2}{79} V_s}} = \frac{1}{1 - \frac{79 \cdot O_2}{21 \cdot N_2}}$$

$$\Delta L = \frac{O_2}{100} V_s \frac{100}{21} = \frac{O_2}{21} V_s$$

$$L = \frac{N_2}{100} V_s \frac{100}{79} = \frac{N_2}{79} V_s$$

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{100 - (RO_2 + O_2)}} = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{N_2}}$$



## Одређивање коефицијента вишка ваздуха из састава продуката сагоревања

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}$$

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4}{100 - (RO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4)}}$$