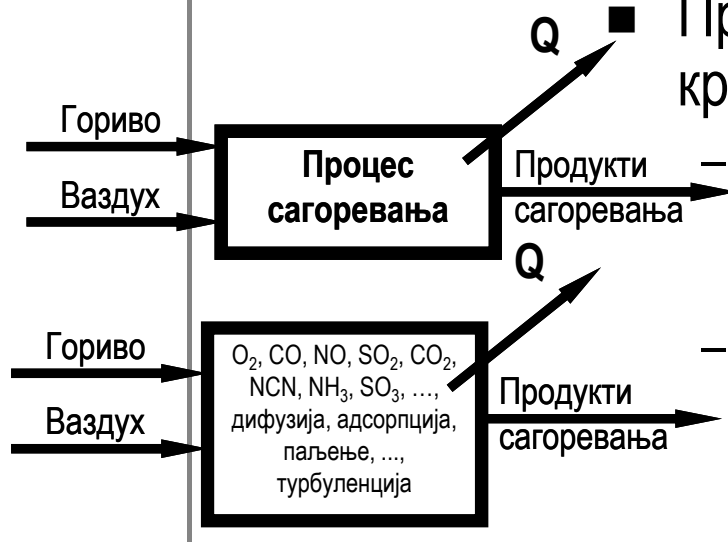




# **Основе сагоревања**

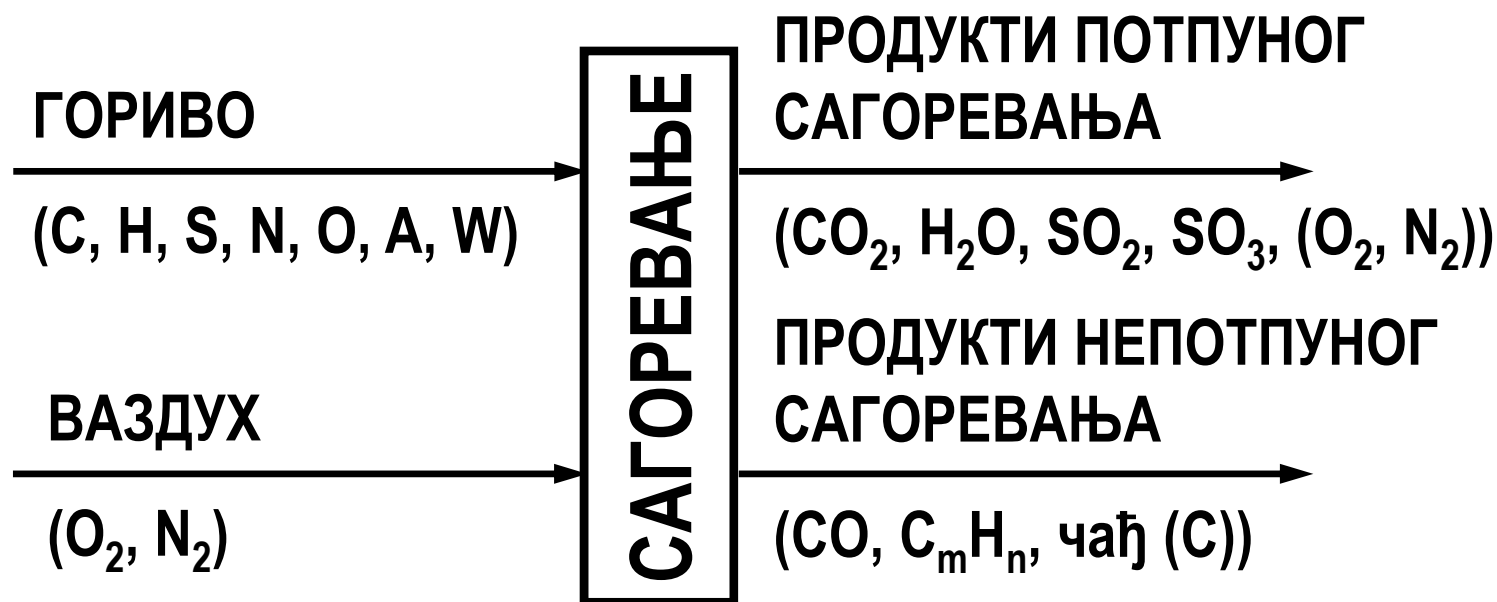
# Сагоревање

- Сагоревање представља сложен физичко-хемијски процес оксидације горива праћен интензивним ослобађањем топлоте.
- При завршеном процесу сагоревања добијају се продукти који се могу одредити помоћу једноставних хемијских једначина.
- Процес сагоревања може да се проучава кроз:

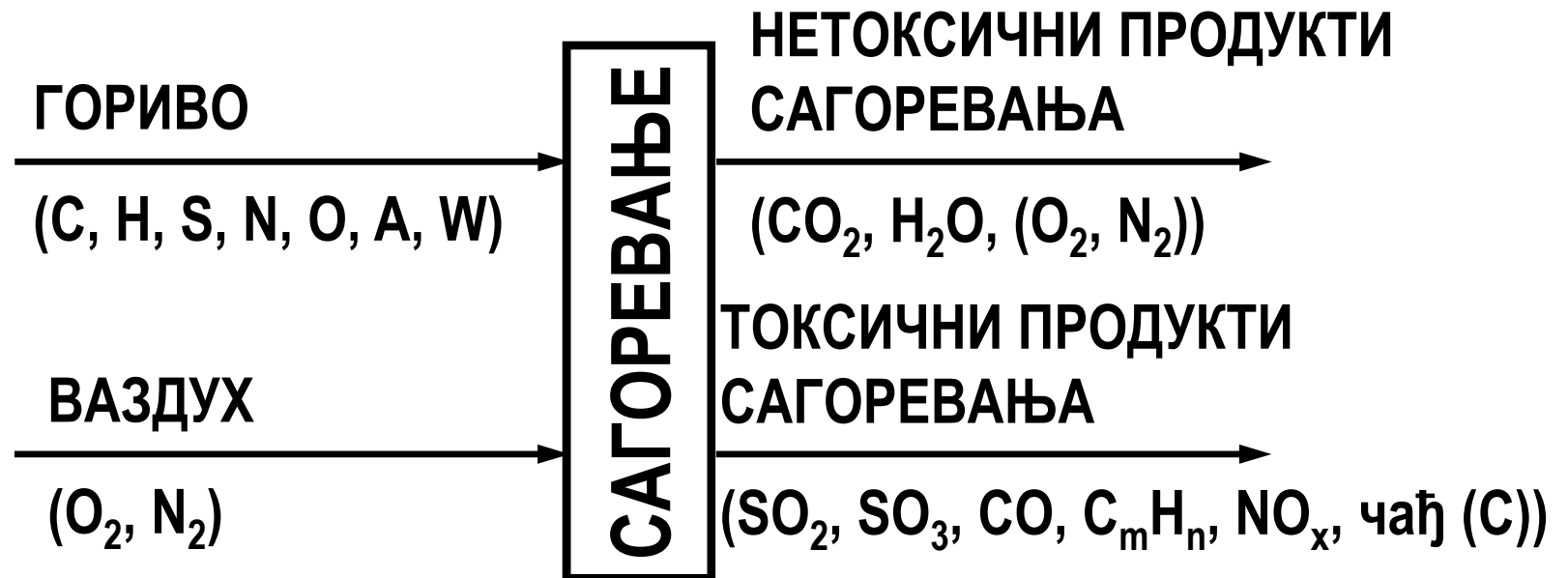


- Статику сагоревања – третирају се само почетно (гориво и ваздух) и крајње (продукти настали при сагоревању) стање
- Динамику сагоревања – третирају се физичко-хемијски процеси који се одвијају током сагоревања.

# Продукти сагоревања – по критеријуму потпуности сагоревања



# Продукти сагоревања – по критеријуму токсичности



# Закони

---

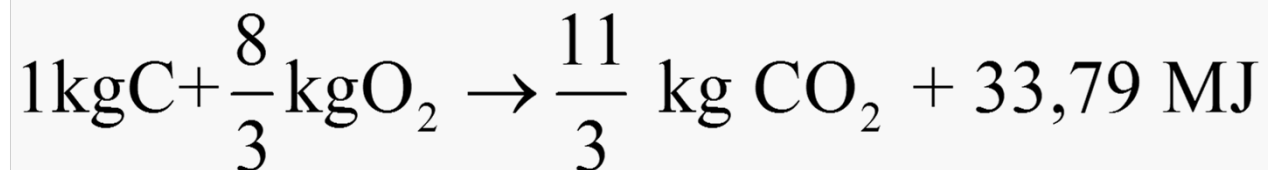
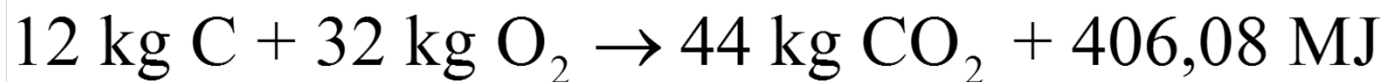
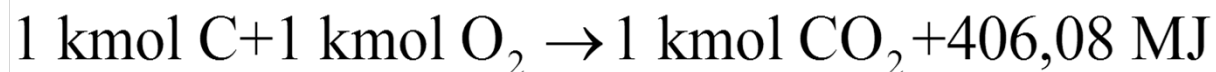
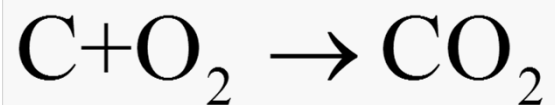
- Основ за постављање материјалног биланса процеса сагоревања представљају:
  - Авогадров закон – у одређеној запремини, при непромењеном притиску и температури, увек се налази исти број молекула идеалног гаса  
**1 mol гаса → 22,4 dm<sup>3</sup> гаса → 6,022×10<sup>23</sup> молекула гаса**
  - Далтонов закон – у изолованим, као и збирним паралелним и узастопним реакцијама, почетне материје се једине и стварају нове (продукте) у одређеним тзв. стехиометријским односима.

# Стехиометријске једначине сагоревања дефинишу

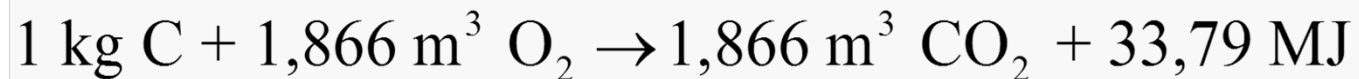
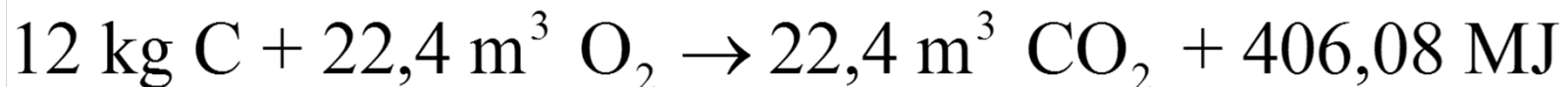
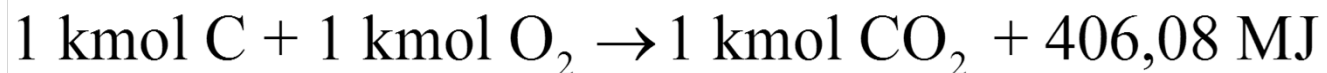
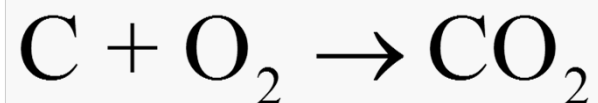
---

- 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.

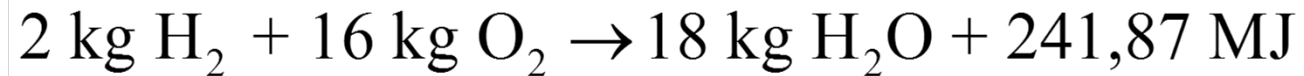
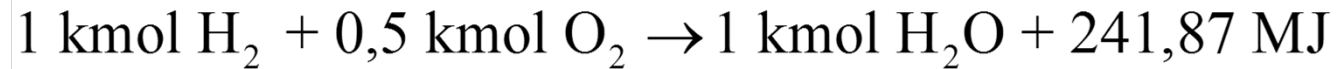
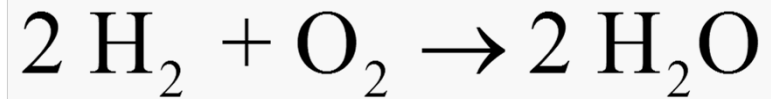
# Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника



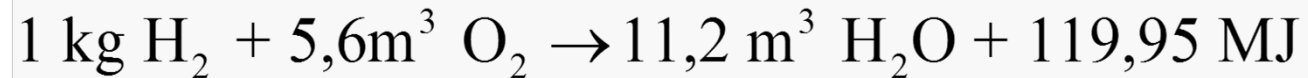
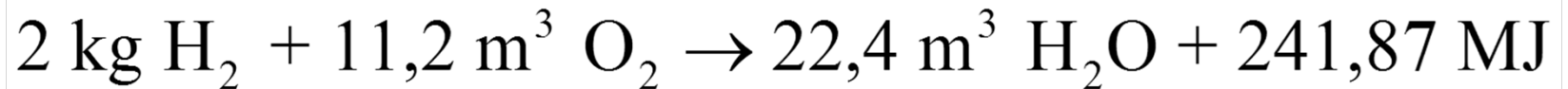
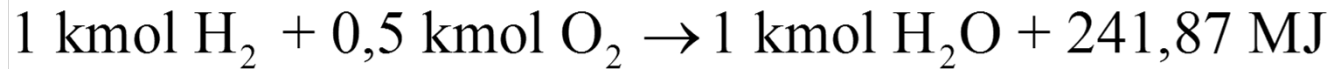
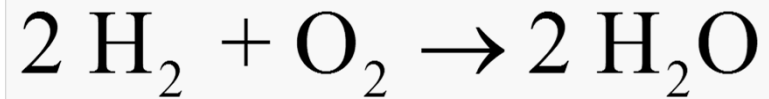
# Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника



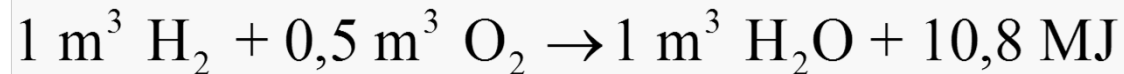
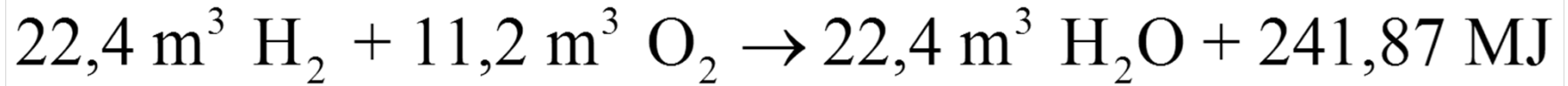
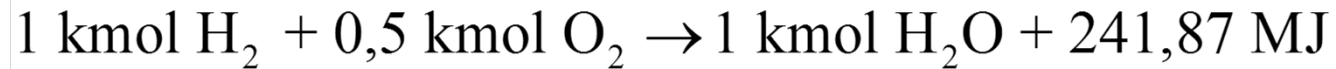
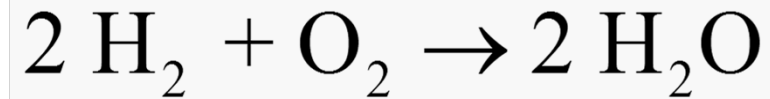
# Стехиометријска једначина сагоревања водоника



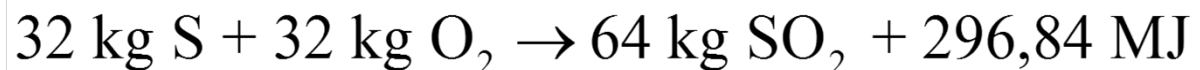
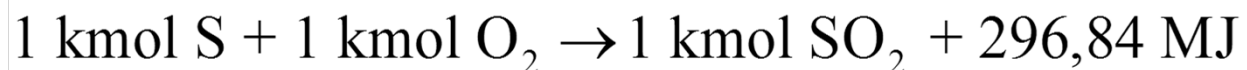
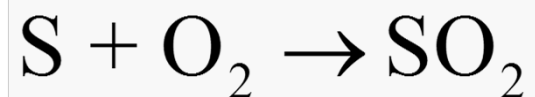
# Стехиометријска једначина сагоревања водоника



# Стехиометријска једначина сагоревања водоника

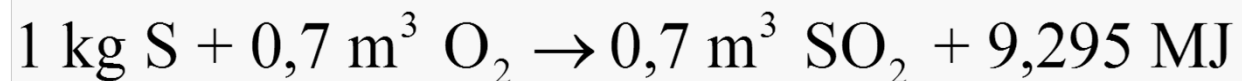
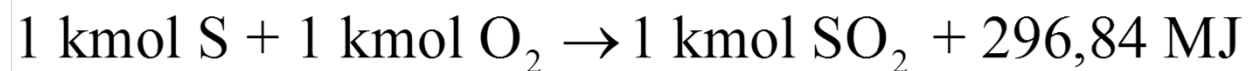
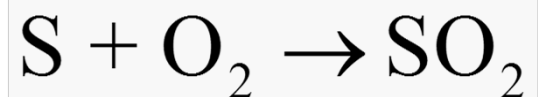


# Стехиометријска једначина сагоревања сумпора



# Стехиометријска једначина сагоревања сумпора

---



# Количина ваздуха потребна за потпуно сагоревање

- Теоријска количина кисеоника

$$V_{O_2}^o = 1,866 \frac{C^r}{100} + 0,7 \frac{S_g^r}{100} + 5,6 \frac{H^r}{100} - \frac{O^r}{100 \rho_{O_2}} \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

- Теоријска количина ваздуха

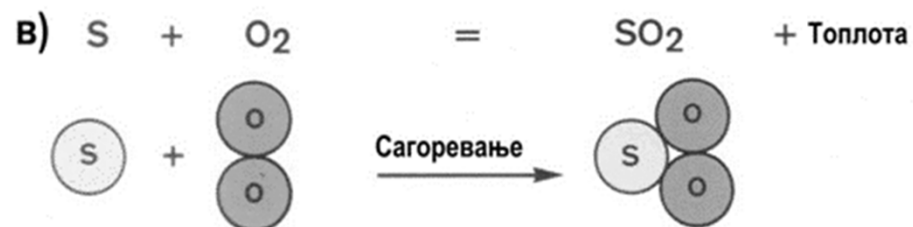
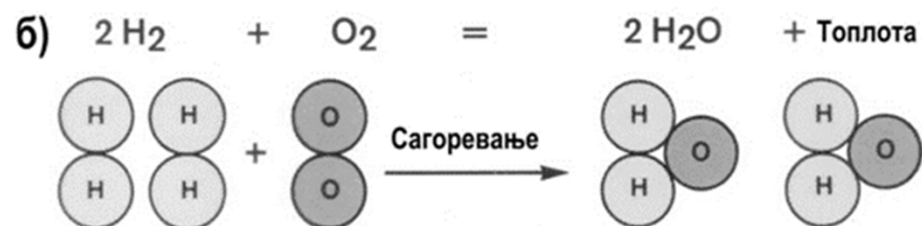
$$V^o = \frac{V_{O_2}^o}{0,21} = \frac{1}{21} \left[ 1,866 C^r + 5,6 \left( H^r - \frac{O^r}{8} \right) + 0,7 S_g^r \right] \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

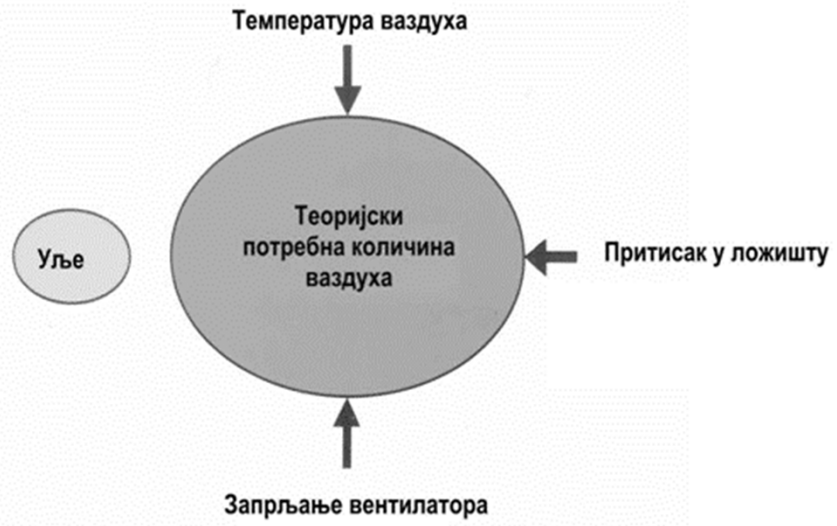
## Потпуно сагоревање

а) Угљеник + Кисеоник = Угљен диоксид + Топлота

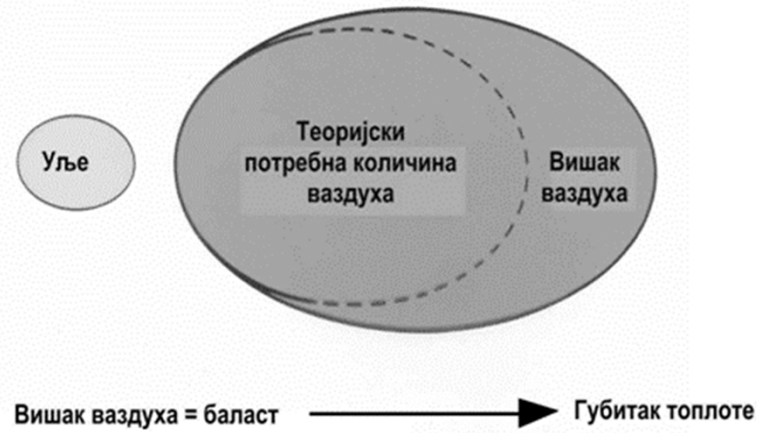
б) Водоник + Кисеоник = Водена пара + Топлота

в) Сумпор + Кисеоник = Сумпор диоксид + Топлота





Да би се спречио недостатак ваздуха услед дејства спољашњих чинилаца, при сагоревању се користи вишак ваздуха!



# Коефицијент вишка ваздуха

- У процес сагоревања доводи се већа количина ваздуха од теоријске из следећих разлога:
  - процес сагоревања се успорава током реакција због смањења концентрације горива и кисеоника у смеси
  - у ложиштима услови за сагоревање су погоршани због несавршеног мешања великих количина горива и ваздуха
- Однос стварне и теоријске количине ваздуха представља **коефицијент вишка ваздуха**:

$$\alpha = \frac{V}{V^o}$$

# Стварна количина ваздуха

$$V = \alpha V^o \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)$$

- У ложиште парног котла доводи се количина ваздуха која је од теоријске већа за вишак ваздуха

$$\Delta V = V - V^o = (\alpha - 1) V^o \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)$$

# Запремина продуката сагоревања

$$V_{CO_2} = 1,866 \frac{C^r}{100}$$

$$V_{SO_2} = 0,7 \frac{S_g^r}{100}$$

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1,866 \frac{C^r}{100} + 0,7 \frac{S_g^r}{100}$$

$$V_{N_2}^o = 0,79V^o + \frac{N^r}{100\rho_{N_2}} = 0,79V^o + 0,08N^r$$

$$V_{H_2O}^o = 11,2 \frac{H^r}{100} + \frac{W^r}{100\rho_{H_2O}} + v_{H_2O}V^o$$

$$V_{H_2O}^o = \frac{1}{100} (11,2H^r + 1,244W^r + 1,61V^o)$$

(m<sup>3</sup>/kg)

# Теоријска запремина продуката сагоревања

- Теоријска запремина сувих продуката сагоревања

$$V_{gs}^o = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2}^o \quad \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

- Теоријска запремина влажних продуката сагоревања

$$V_g^o = V_{gs}^o + V_{H_2O}^o \quad \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

# Стварна запремина продуката сагоревања

- Стварна запремина сувих продуката сагоревања

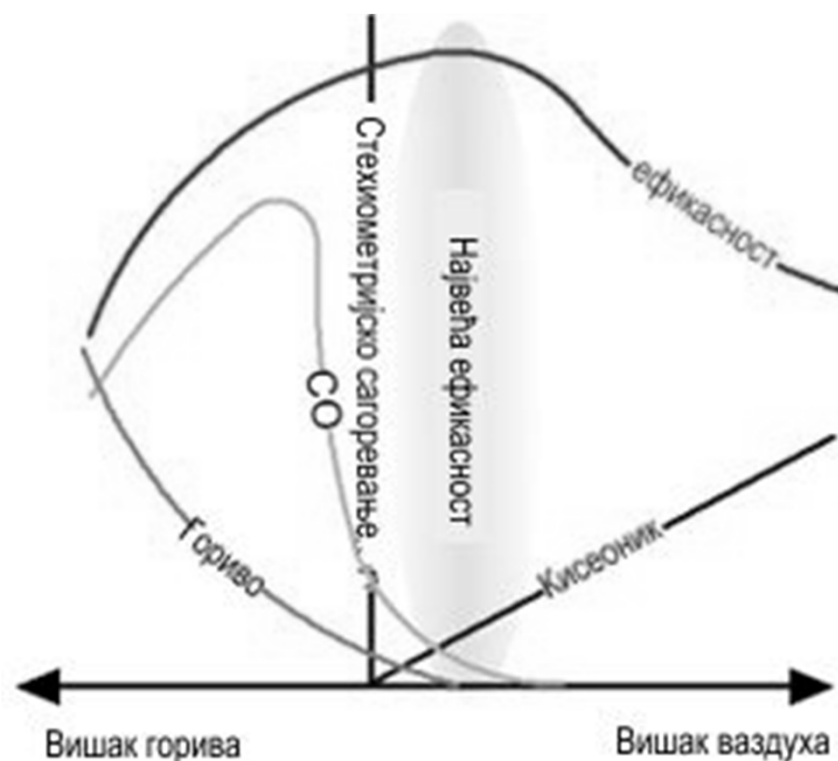
$$V_{gs} = V_{gs}^o + (\alpha - 1)V^o \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)$$

- Стварна запремина влажних продуката сагоревања

$$V_g = V_{gs} + V_{H_2O} \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)$$

# Одређивање коефицијента вишка ваздуха

- Основна квалитативна карактеристика процеса сагоревања у ложиштима парних котлова је његова потпуност при минималном вишку ваздуха, коме одговара максимална температура процеса сагоревања.



# Одређивање коефицијента вишка ваздуха

- У експлоатацији треба систематски контролисати састав продуката сагоревања и одређивати коефицијент вишка ваздуха и хемијску непотпуност сагоревања. За то се користи гасна анализа, која се врши помоћу анализатора гасова. На основу резултата гасне анализе одређује се коефицијент вишка ваздуха.
- При потпуном сагоревању, коефицијент вишка ваздуха дефинисан је изразом преко садржаја троатомских гасова ( $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ )

$$\alpha = \frac{RO_{2\max}}{RO_2}$$

# Одређивање коефицијента вишка ваздуха

- Уобичајени садржај сумпора у гориву је знатно мањи од садржаја угљеника, па се израз може написати у облику који се користи у пракси

$$\alpha \cong \frac{CO_{2\max}}{CO_2}$$

- Савршенији образац за одређивање коефицијента вишка ваздуха је образац преко садржаја кисеоника у стварним сувим продуктима сагоревања

$$\alpha \cong \frac{21}{21 - O_2}$$

- Ако ложишни уређаји парног котла нису правилно одабрани, ако је вођење процеса неправилно, стварају се продукти непотпуног сагоревања, као што су угљен моноксид (CO), водоник (H<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>) и други. Највероватнији продукт непотпуног сагоревања је угљен моноксид.

# Одређивање коефицијента вишка ваздуха

- Коефицијент вишка ваздуха за случај непотпуног сагоревања, када је у продуктима сагоревања присутан само угљен-моноксид може се одредити по обрасцу

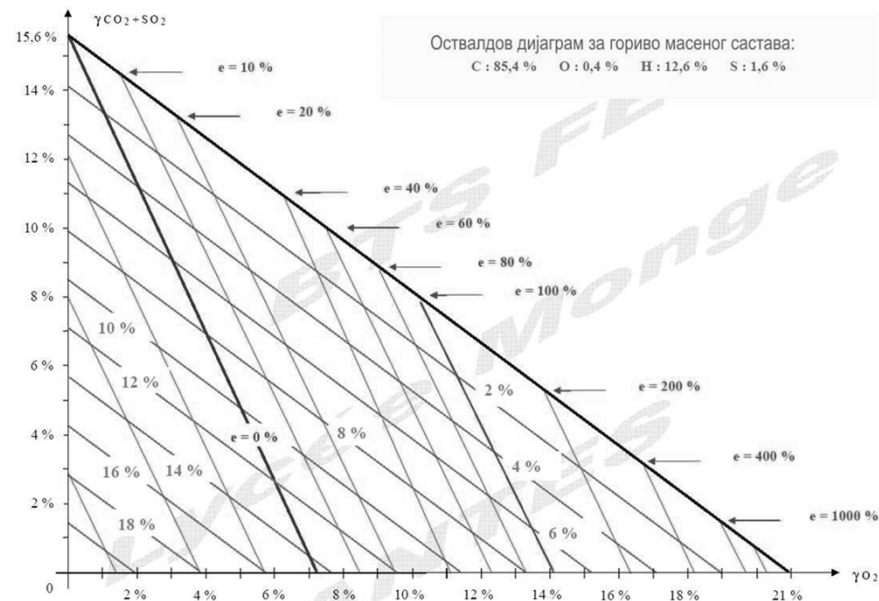
$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2 - 0,5CO}{N_2}}$$

- Ако се занемари садржај азота у гориву, процентни садржај азота у сувим продуктима сагоревања износи

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO) \quad [\%]$$

# Одређивање коефицијента вишка ваздуха

- Контрола сагоревања познатог горива може да се изврши помоћу такозваног Оствалдовог троугла ако је познат садржај  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}$  у сувим продуктима сагоревања.



# Енталпија продуката сагоревања

- Енталпија продуката сагоревања је количина топлоте која се доводи продуктима потпуног сагоревања јединице масе или запремине горива при константном притиску да би се од почетног стања ( $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) загрејали до одређене температуре.
- Енталпија продуката сагоревања састоји се од енталпије теоријске количине продуката сагоревања, енталпије вишка ваздуха и енталпије летећег пепела:

$$I_g = I_g^o + I_{vv} + I_{lp} \quad [\text{kJ} / \text{kg}]; \quad [\text{kJ} / \text{m}^3]$$

# Енталпија продуката сагоревања

- Енталпија теоријске количине продуката сагоревања представља збир енталпија сувих троатомских гасова, теоријске запремине азота и теоријске запремине водене паре

$$I_g^0 = V_{\text{RO}_2} c_{p\text{CO}_2} t + V_{\text{N}_2}^0 c_{p\text{N}_2} t + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 c_{p\text{H}_2\text{O}} t \quad [\text{kJ} / \text{kg}]; \quad [\text{kJ} / \text{m}^3]$$

$$I_g^0 = \left( V_{\text{RO}_2} c_{p\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 c_{p\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 c_{p\text{H}_2\text{O}} \right) t \quad [\text{kJ} / \text{kg}]; \quad [\text{kJ} / \text{m}^3]$$

# Енталпија продуката сагоревања

- Енталпија вишка ваздуха је

$$I_{vv} = (\alpha - 1) V^o c_{pv} t \text{ [kJ / kg]}; \text{ [kJ / m}^3 \text{]}$$

- Енталпија летећег пепела усваја се када је редукована количина летећег пепела

$$\frac{a_{lp} A^r}{H_d} 10^3 \geq 1,5 \text{ [%kg / kJ]}$$

И ИЗНОСИ:

$$I_{lp} = \frac{a_{lp} A^r}{100} c_{lp} t \text{ [kJ / kg]}$$

$a_{lp}$  – удео летећег пепела (усваја се из литературе)

# Енталпија продуката сагоревања

- Енталпија продуката сагоревања је

$$I_g = \left[ V_{\text{RO}_2} c_{p\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^{\circ} c_{p\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} c_{p\text{H}_2\text{O}} + (\alpha - 1) V^{\circ} c_{pvt} + \frac{a_{lp} A^r}{100} c_{lp} \right] t \quad [\text{kJ/kg}]; \quad [\text{kJ} / \text{m}^3]$$

- Израз у средњој загради представља топлотни капацитет продуката сагоревања па је енталпија

$$I_g = (Vc)_g t \quad [\text{kJ/kg}]; \quad [\text{kJ} / \text{m}^3]$$

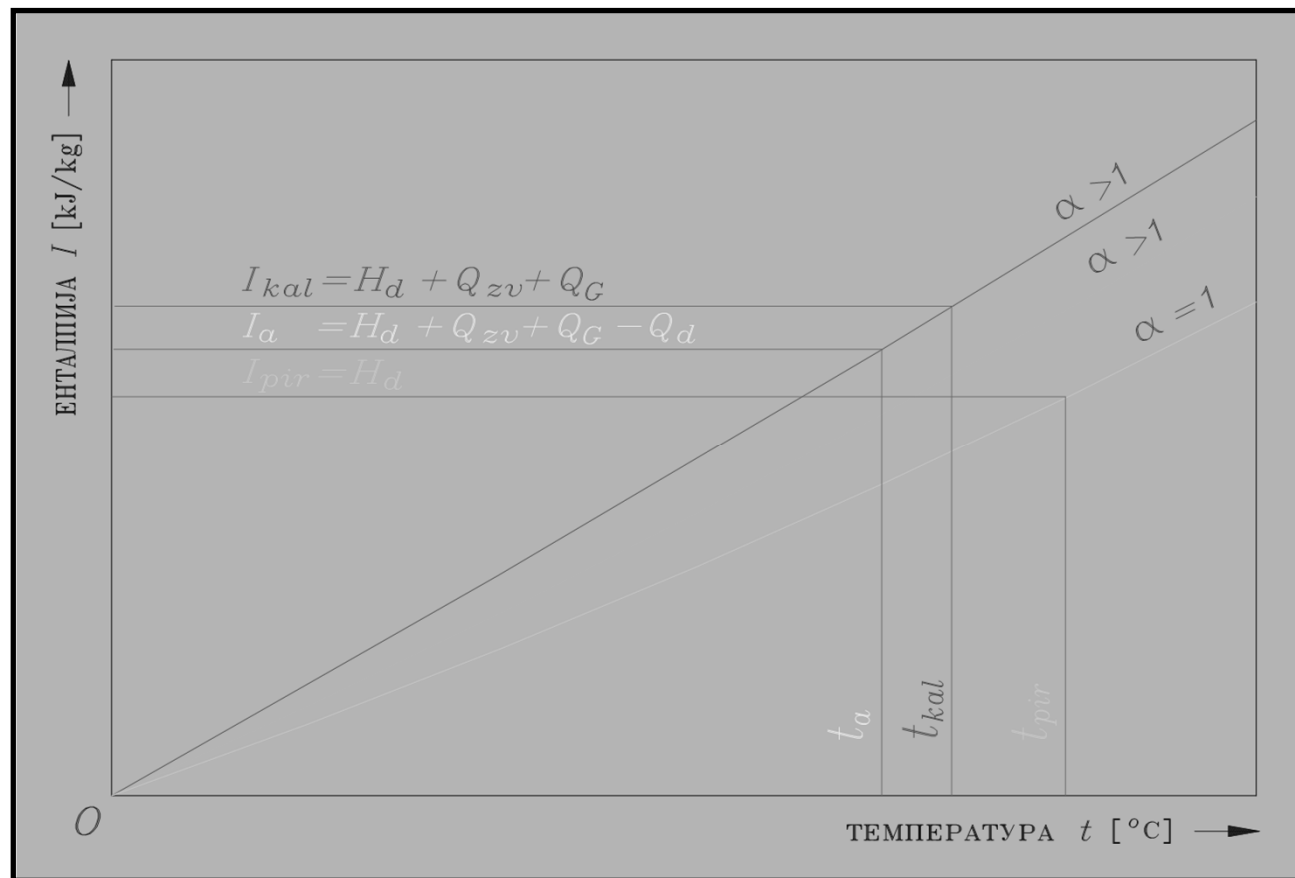
- Графички приказ зависности енталпије продуката сагоревања од температуре назива се  $I - t$  дијаграм и он се може израдити ако је позната елементарна анализа горива за претпостављене температуре и коефицијенте вишка ваздуха.

# Температура сагоревања

---

- Температура која може да се постигне при сагоревању горива са кисеоником из ваздуха зависи од коефицијента вишка ваздуха, температуре и влажности ваздуха, температуре горива, ефикасности процеса сагоревања, дисоцијације продукта сагоревања на високим температурама и тако даље.
- Врсте
  - Пирометријска
  - Калориметарска
  - Адијабатска

# Температура сагоревања



# Температура сагоревања - пирометријска

- Температура која се постиже при потпуном изобарском сагоревању фосилног горива температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  са теоријском количином ваздуха ( $V^{\circ}$ ) стандардног састава при нормалним условима ( $p = 0,101325\text{ MPa}$  и  $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), под условом да се целокупна количина топлоте ослобођена сагоревањем горива користи само за загревање продуката сагоревања назива се пирометријском

$$t_{\text{pir}} = \frac{H_d}{(V \cdot c)_g^{\circ}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- $(V \cdot c)_g^{\circ}$  - [kJ/kgK] енталпија теоријске количине продуката сагоревања

# Температура сагоревања - калориметарска

- Ако гориво температуре више од нуле сагорева са вишком ваздуха већим од 1, чија је температура такође виша од нуле, опет без одавања ослобођене топлоте, гасовити продукти сагоревања се загревају до такозване калориметријске температуре

$$t_{\text{kal}} = \frac{H_d + Q_{zv} + Q_G}{(V \cdot c)_g} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

- где су  $Q_{zv}$  и  $Q_G$  [kJ/kg] ; [kJ/m<sup>3</sup>] - количине топлоте које се уносе у процес загрејаним или незагрејаним ваздухом и горивом

# Температура сагоревања - адијабатска

- Ако се узме у обзир топлота која се троши на дисоцијацију компонената продуката сагоревања, добија се такозвана теоријска или адијабатска температура продуката сагоревања

$$t_a = \frac{H_d + Q_{zv} + Q_G - Q_d}{(V \cdot c)_g} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Количина топлоте која се троши при дисоцијацији компонената продуката сагоревања парних котлова може се занемарити, пошто се она хлађењем гасова испод  $1500^{\circ}\text{C}$  ослобађа и бива искоришћена. Према томе, при сагоревању горива у котловима је  $Q_d = 0$ , па су калориметријска и теоријска (адијабатска) температура једнаке ( $t_{kal} = t_a$ ).