



# Сагоревање М

др Владимир Јовановић, ван.проф.



# Основне информације

## ■ Бодови

- |                              |    |
|------------------------------|----|
| – 2 теста (теорија + задаци) | 40 |
| – 1 колоквијум               | 10 |
| – 1 самостални задатак       | 5  |
| – похађање наставе           | 5  |

## ■ Термини

- |   |             |
|---|-------------|
| – T1  | 21.04.2026. |
| – T2  | 02.06.2026. |
| – Колоквијум  | 09.06.2026. |
| – поправни (само један) приликом полагања усменог дела испита |             |



# Основне информације

- Услов за полагање усменог испита је **30 поена** стечених за извршавање предиспитних обавеза без посебних услова у погледу начина стицања поена (за коју од предиспитних обавеза).
- Усмени испит вреди **40 поена** и коначна оцена се утврђује на основу броја поена стечених за извршавање предиспитних обавеза и броја поена стечених на усменом испиту.



# Основне информације

## ■ Информације

- <https://nastava.mas.bg.ac.rs/nastava/viewforum.php?f=845>

## ■ Консултације

- уторак 11:00-13:00 h каб./лаб. 147/151

## ■ Литература

- Радовановић М.: Горива
- Драшковић Д., Радовановић М., Аџић М.: Сагоревање
- Јовановић В.: Приручник за лабораторијске вежбе из Погонских материјала
- М. Радовановић: Приручник за лабораторијске вежбе из сагоревања
- **Помоћна литература** су ИЗВОДИ са предавања и вежби и они су доступни на званичном сајту Машинског факултета Универзитета у Београду, на адреси:

<https://nastava.mas.bg.ac.rs/nastava/viewforum.php?f=845>



# Гориве материје



# Појам горива

- Материје које сагоревањем (бурним сједињавањем са кисеоником), поред материјалних продуката процеса (продуката сагоревања), ослобађају одређену количину топлоте.





# Захтеви – материја као гориво

- Да процесом сагоревања производи знатну количину топлоте у кратком временском периоду.
- Да се у природи налази у довољним количинама.
- Да је експлоатација релативно лака и економична.
- Да је производни процес технички остварљив и рентабилан.
- Да у себи не садржи велику количину негоривих материја.
- Да не мења битно свој састав при складиштењу, транспорту и руковању.
- ...



# Врсте горива

Према агрегатном стању	Према степену прераде	
	Природна	Прерађена
Чврсто	Дрво, тресет, угаљ, гориви шкриљци, биомаса	Дрвени угаљ, брикети, пелети, полукокс, кокс
Течно	Нафта	Бензин, петролеј, дизел, уља за ложење
Гасовито	Природни (земни) гас	Рафинеријски, дестилациони, генераторски, биогаз



# Нека друга горива и оксидатори (ракетна техника)

- Као горива се користе:
  - керозин, алкохол, хидразин ( $N_2H_4$ ) и његови деривати и течни водоник.
- Као оксидатори користе се:
  - азотна киселина, азот тетраоксид ( $N_2O_4$ ), течни кисеоник и течни флуор.



# Горива

Фосилна горива

Обновљива горива

Природна

Произведена

Природна

Произведена

Чврста

тресет  
угаљ  
гориви шкриљци

брикети  
кокс

Чврста

Чврста

дрвна биомаса  
пољопривредна биомаса  
алге

дрвени угаљ  
брикети  
пелети

Чврста

Течна

нафта

моторни бензин  
дизел гориво  
уља за ложење  
петролеј  
керозин

Течна

Течна

торификовани пелети/брикети

биометанол  
биоетанол  
биодизел

Течна

Гасовита

барски гас  
јамски гас  
природни земни гас

дестилациони гас  
рафинеријски гас  
течни нафтни гас  
генераторски гас

Гасовита

Гасовита

биотечности

биогаз  
водоник

Гасовита

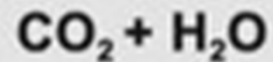




# Сагоревање у кисеонику и ваздуху

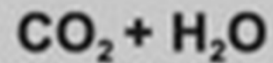
Гориво

Кисеоник



Гориво

Ваздух





# Састав горива – елементарна анализа



- Гориви елементи:
  - C, H, S
- Баласт:
  - Унутрашњи: O, N
  - Спољашњи: A, W



# Топлотна моћ

- Количина топлоте која се ослобађа при потпуном сагоревању јединице количине (масе, запремине или материје) горива.

Топлотна моћ – калорична вредност – топлота сагоревања



# Топлотна моћ - подела

- **Према условима сагоревања**
  - $p = \text{const}$
  - $V = \text{const}$
- **Према топлотном нивоу продуката сагоревања**
  - Горња топлотна моћ  $H_g$
  - Доња топлотна моћ  $H_d$



# Горња топлотна моћ

- Количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице количине горива под следећим условима:
  - Угљеник и сумпор из гориве материје су сагорели у своје диоксиде, док до сагоревања азота није дошло.
  - Продукти сагоревања су охлађени на температуру коју је гориво имало пре почетка сагоревања (20 °C)
  - Вода, која у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и сагорелог водоника, преведена је у течно стање.



# Доња топлотна моћ

- Количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:
  - Угљеник и сумпор из гориве материје су сагорели у своје диоксиде, док до сагоревања азота није дошло.
  - Продукти сагоревања су охлађени на температуру коју је гориво имало пре почетка сагоревања (20 °C).
  - Вода, која у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и сагорелог водоника, остаје у парном стању.



# Веза између горње и доње топлотне моћи



$$H_g = H_d + 25 \cdot (9 \cdot H + W) \quad (\text{kJ/kg})$$

$$H_g = H_d + 2500 \cdot (9 \cdot g_H + g_W) \quad (\text{kJ/kg})$$

- Количина топлоте која се добија ако се вода, настала сагоревањем водоника и испаравањем влаге, преведе из парног у течно стање
- Топлота испаравања воде (кондензације водене паре) на атмосферском притиску је око 2500 kJ/kg.
- При сагоревању 1 kg водоника, добија се 9 kg воде.



# Начини одређивања топлотне моћи горива



- Експериментално одређивање
  - Калориметар са бомбом
  - Јункерсов калориметар
- Рачунско одређивање



# Рачунско одређивање топлотне моћи горива

- На бази елементарног састава  
– VDI обрасци

$$H_g = 340C + 1420 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 93S_G \quad (\text{kJ/kg})$$

$$H_d = 340C + 1190 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 93S_G - 25W \quad (\text{kJ/kg})$$



# Рачунско одређивање топлотне моћи горива на основу познатог састава по горивим компонентама

$$H_g = 127,5 \cdot H_2 + 126,2 \cdot CO + 398,1 \cdot CH_4 + 632,4 \cdot C_2H_4 + \dots \quad (\text{MJ/m}^3)$$

$$H_d = 107,8 \cdot H_2 + 126,2 \cdot CO + 358,7 CH_4 + 594,8 \cdot C_2H_4 + \dots \quad (\text{MJ/m}^3)$$



# Основи сагоревања

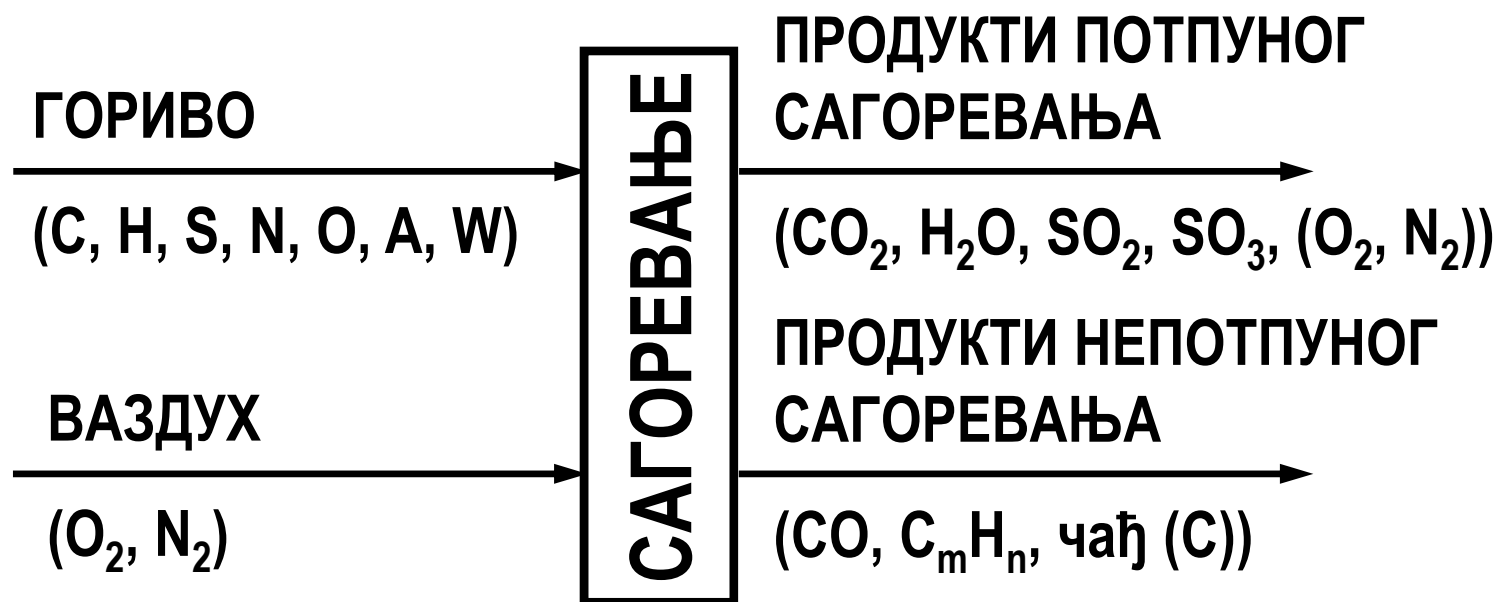


# Сагоревање

- Сагоревање представља 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.

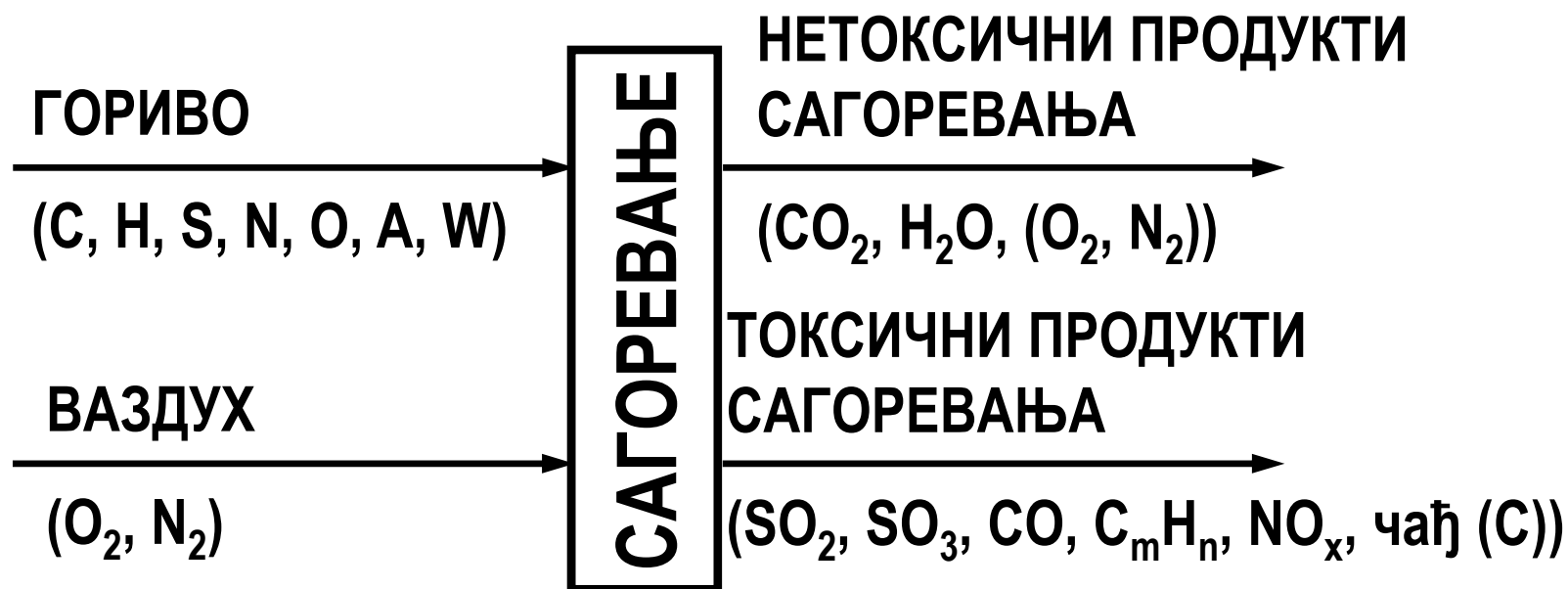


# Продукти сагоревања – класификација по критеријуму потпуности сагоревања





# 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.



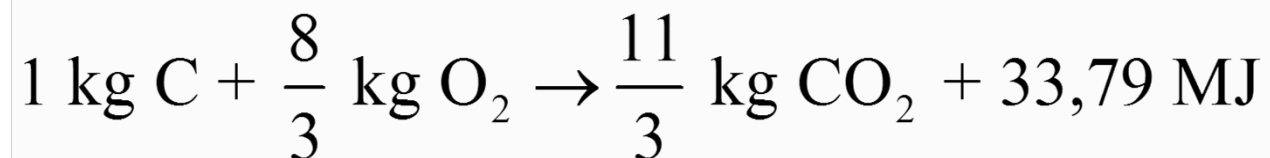
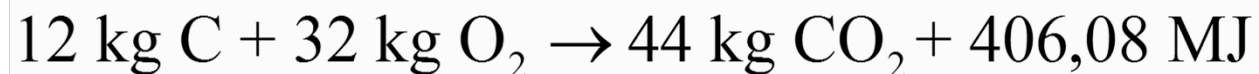
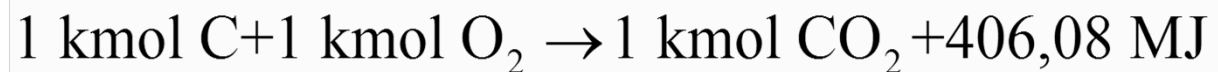
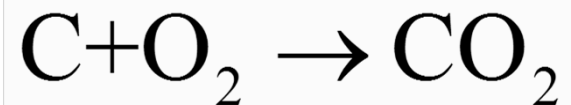
# Шта мора да се зна?

- атомске масе хемијских елемената који учествују у процесу сагоревања:

– угљеник	12 kg/kmol
– водоник	1 kg/kmol
– сумпор	32 kg/kmol
– кисеоник	16 kg/kmol
– азот	14 kg/kmol

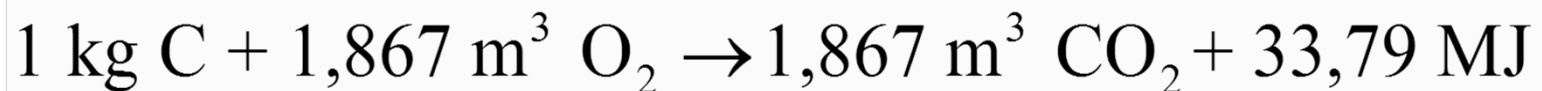
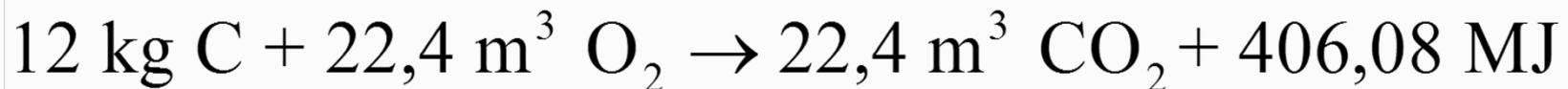
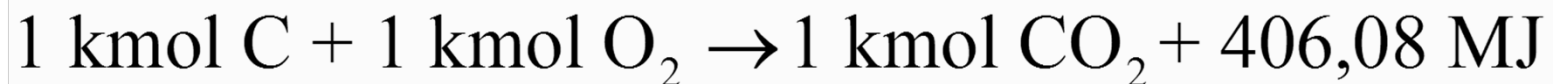
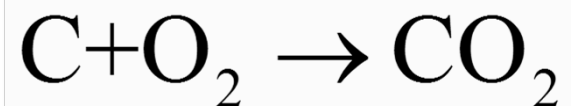


# Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника ✓



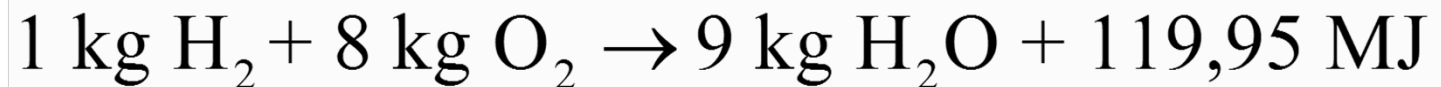
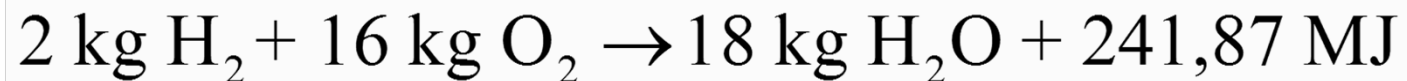
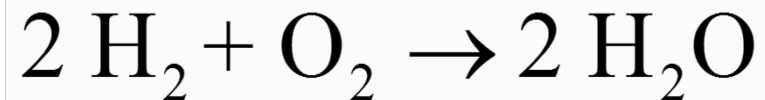


# Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника ✓



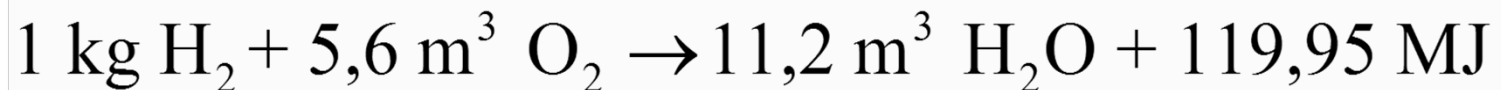
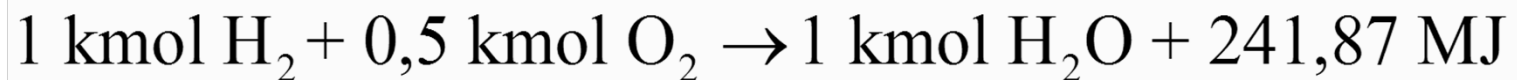
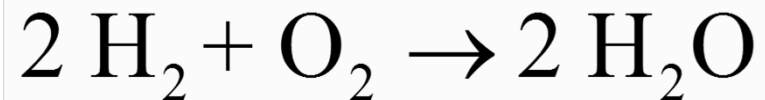


# Стехиометријска једначина сагоревања водоника



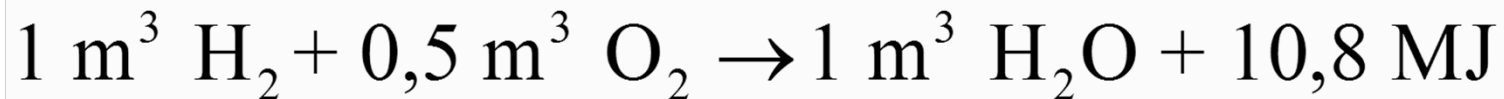
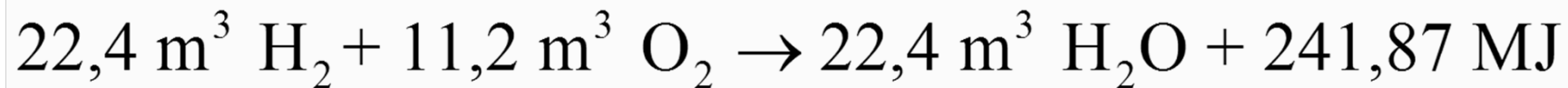
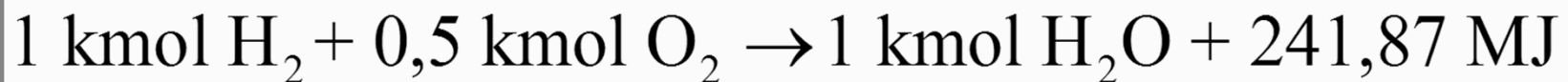
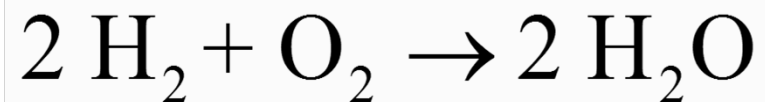


# Стехиометријска једначина сагоревања водоника



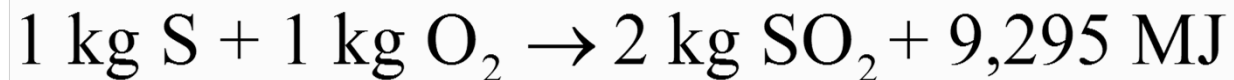
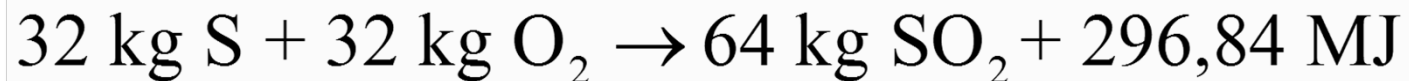
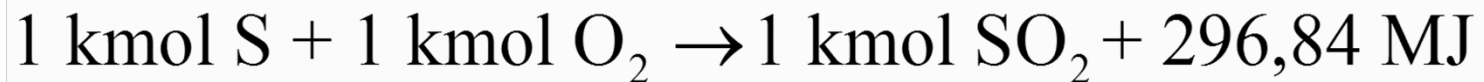
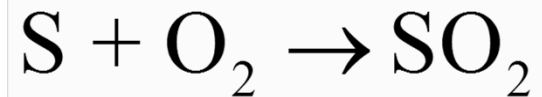


# Стехиометријска једначина сагоревања водоника



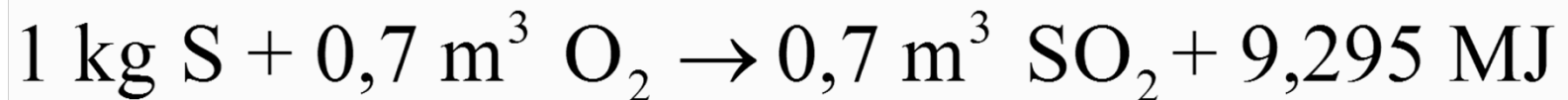
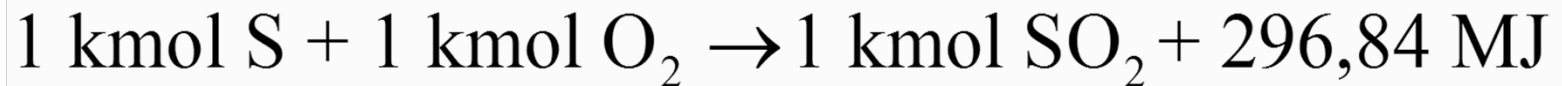
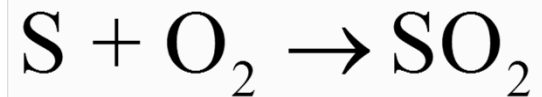


# Стехиометријска једначина сагоревања сумпора





# Стехиометријска једначина сагоревања сумпора





# Теоријска количина кисеоника за потпуно сагоревање

За гориво типа:  $C_m H_n$

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

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

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

За гориво типа:  $C_m H_n O_o$

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

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

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



# Одређивање теоријске количине кисеоника



$$O_{\min} (\text{kg/kg}) = O_{\min\text{C}} (\text{kg/kg}) + O_{\min\text{H}} (\text{kg/kg}) + O_{\min\text{S}} (\text{kg/kg})$$

$$O_{\min} (\text{m}^3/\text{kg}) = O_{\min\text{C}} (\text{m}^3/\text{kg}) + O_{\min\text{H}} (\text{m}^3/\text{kg}) + O_{\min\text{S}} (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$O_{\min} (\text{m}^3/\text{m}^3) = O_{\min\text{C}} (\text{m}^3/\text{m}^3) + O_{\min\text{H}} (\text{m}^3/\text{m}^3) + O_{\min\text{S}} (\text{m}^3/\text{m}^3)$$



# Одређивање теоријске количине ваздуха



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

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

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



# Стварна количина ваздуха и коефицијент вишка ваздуха

- Стварна количина ваздуха

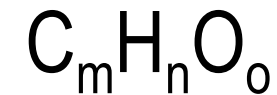
$$L = \lambda L_{\min}$$

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



# Количина продуката сагоревања

$$V_{\text{CO}_2} \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = \frac{22,4m}{12m+n+16o}$$



$$V_{\text{H}_2\text{O}} \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = \frac{11,2n}{12m+n+16o}$$

Гасовита  
горива

$$V_{\text{CO}_2} \left( \text{m}^3 / \text{m}^3 \right) = r_{\text{CO}} + r_{\text{CO}_2} + \sum r_i \cdot m_i$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} \left( \text{m}^3 / \text{m}^3 \right) = r_{\text{H}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{1}{2} \sum r_i \cdot n_i$$



# Количина продуката сагоревања



$$V_v \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}$$

$$V_s \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = V_v - V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}$$



# Састав продуката сагоревања

$$X = \frac{V_X}{V_{ps}} \cdot 100 \quad (\% v/v)$$

X – x-ти продукт сагоревања

ps – продукти сагоревања (влажни/суви)

Пример за угљен диоксид:

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



# Одређивање коефицијента вишка ваздуха из састава продуката сагоревања

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

потпуно сагоревање ✓

непотпуно сагоревање

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



# Температура сагоревања

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



# Калориметарска температура сагоревања ✓

- то се математички изражава:

$$h_G + L_{stv} \cdot h_{vaz} + H_d = t_s \cdot \sum_{i=1}^k V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}$$

- када се овај израз реши по  $t_s$  добија се израз за израчунавање температуре сагоревања:

$$t_s = \frac{h_G \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg горива}} \right] + L_{stv} \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ ваздуха}}{\text{kg горива}} \right] \cdot h_{vaz} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ ваздуха}} \right] + H_d \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg горива}} \right]}{\sum_{i=1}^k V_i \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg горива}} \right] \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}} \right]}$$



# 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** продукта сагоревања на повишеним температурама **и услед размене топлоте са околином**.

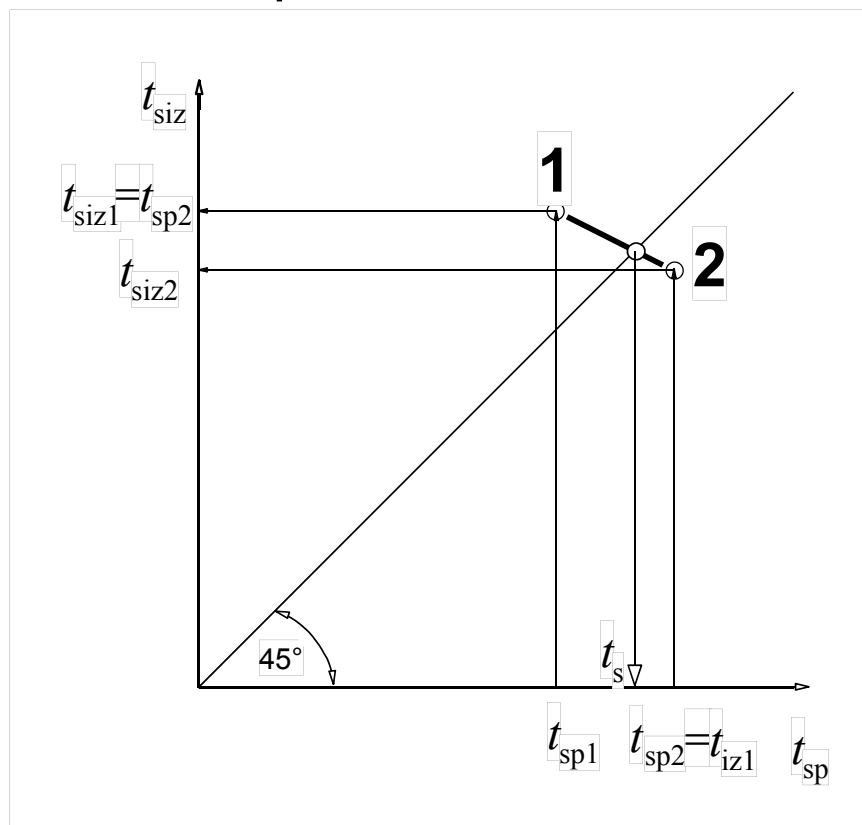
$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G - Q_d - Q_{tg}}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}}$$



# Калориметарска температура сагоревања



- графички начин решавања:





# Калориметарска температура сагоревања



- аналитички начин решавања:

$$\frac{|t_{iz_i} - t_{sp_i}|}{t_{sp_i}} \cdot 100 \leq 5$$