



# Погонски материјали 2

предавања



# Основне информације

## ■ Бодови

– 1 тест	40
– 1 колоквијум	10
– 1 задатак	5
– похађање наставе	5

## ■ Термини

– Т1	друга седмица у јануару 2025.
– поправни Т1	према договору



# Основне информације

---

- Услов за полагање усменог испита је **20 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=355>
- Консултације
  - четвртак                      12-13 h                      каб./лаб. 147/151
- Литература
  - Радовановић М.: Горива
  - Радовановић М.: Индустриска вода
  - Рац А.: Мазива
  - Јовановић В.: Приручник за лабораторијске вежбе из Погонских материјала
  - 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=355>



# Гориве материје



# Гориво – шта је то?

- **Материја које сагоревањем (бурним сједињавањем са кисеоником), поред материјалних продуката процеса (продуката сагоревања), ослобађа одређену количину топлоте.**



# Сагоревање – шта је то?

- **Сагоревање** представља сложен физичко-хемијски процес бурне реакције горива и оксидатора праћен интензивним ослобађањем топлоте.
- **За сагоревање је неопходно направити гориву смешу** – мешавину горива и оксидатора.



# Шта може да буде 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, гасна уља (дизел гориво и екстра лако уље за ложење), уља за ложење (средње и тешко)
Гасовито	Природни (земни) гас	Рафинеријски, дестилациони, генераторски, биогаз



# Горива

## Фосилна горива

## Обновљива горива

### Природна

### Произведена

### Природна

### Произведена

Чврста

тресет

угаљ

гориви шкриљци

брикети

кокс

моторни бензин

дизел гориво

уља за ложење

петролеј

керозин

дестилациони гас

рафинеријски гас

течни нафтни гас

генераторски гас

Чврста

Течна

Гасовита

Чврста

дрвна биомаса

пољопривредна биомаса

алге

Течна

Гасовита

дрвени угаљ

брикети

пелети

торификовани пелети/брикети

биометанол

биоетанол

биодизел

биотечности

биогаз

водоник

Чврста

Течна

Гасовита

Течна

нафта

барски гас

јамски гас

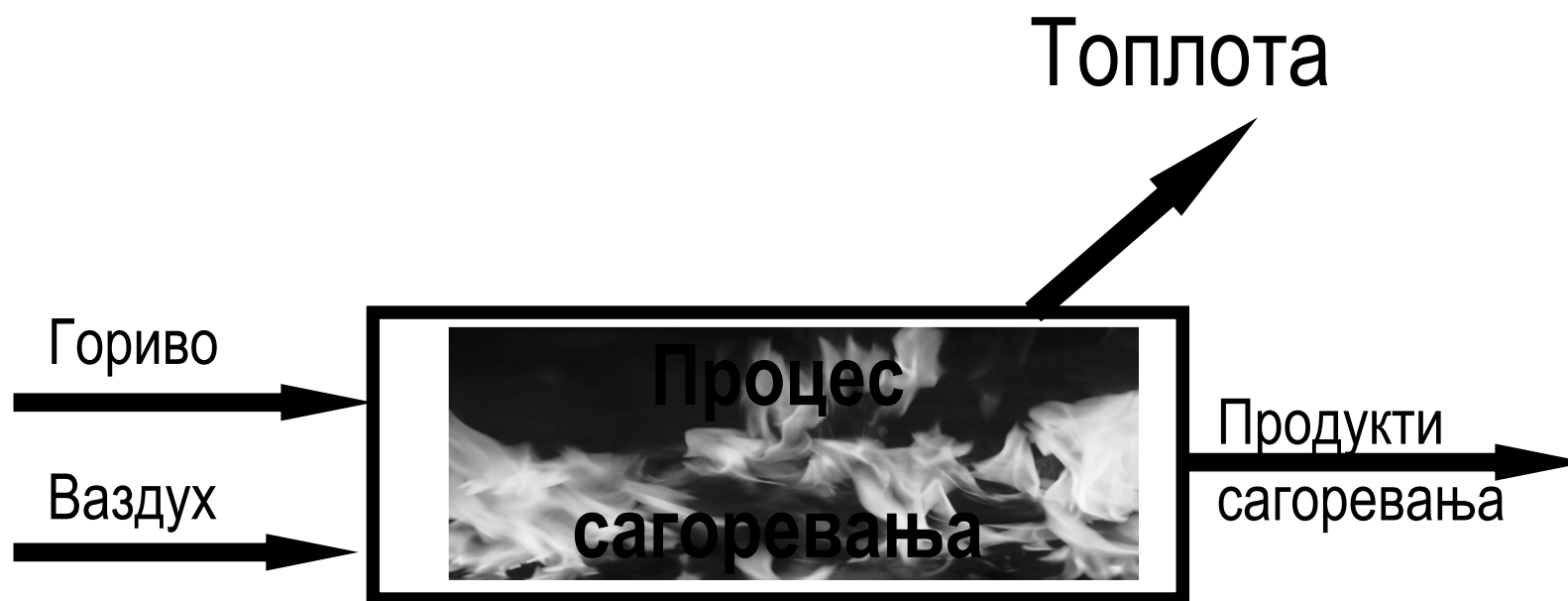
природни земни гас

Гасовита





# Од горива до продуката сагоревања...





# Састав горива – елементарна анализа



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



$$g_C + g_H + g_S + g_O + g_N + g_A + g_W = 1$$

$$C + H + S + O + N + A + W = 100 \%m/m$$



# Угљеник

- Најважнија компонента горива – има га највише и његовим сагоревањем настаје највећи део количине топлоте коју гориво ослобађа.
- Налази се у слободном стању и везан (у сложеним органским једињењима, везан са водоником, кисеоником, азотом и сумпором).
- Сагоревањем 1 kg настаје количина топлоте од 33,829 MJ.
- Максимална температура сагоревања угљеника износи 2240 °C.



# Водоник

- Друга компонента по важности.
- Налази се везан (код чврстих, течних и гасовитих горива) и чист у мешавини са другим горивим компонентама (код гасовитих горива).
- Сагоревањем 1 kg настаје количина топлоте од 142,014 MJ (4,2 пута више у односу на угљеник).
- Максимална температура сагоревања водоника износи 2235 °C.



# Сумпор

- **Јавља се у виду горивог и негоривог.**
- **Негориви - сулфатни (у облику сулфата гвожђа, калцијума и др.) током сагоревања прелази у пепео.**
- **Гориви се јавља као**
  - органски (у облику сложених органских једињења) и
  - пиритни (сједињен са гвожђем –  $\text{FeS}_2$ ).
- **Сагоревањем 1 kg настаје количина топлоте од 9,295 MJ, али је непожељан јер продукти његовог сагоревања делују кородивно и утичу на загађење животне средине.**



# Кисеоник

- **Није гориви елемент, али помаже и омогућава сагоревање.**
- **Јавља се везан са другим елементима, а у гасовитим горивима јавља се и у слободном стању (у мањим количинама).**
- **Смањује потребну количину кисеоника за сагоревање.**





# Азот

- **Јавља се у виду сложених органских једињења.**
- У чврстим и течним горивима има га мало (0-2 %), а код гасовитих горива (нарочито произведених) може га бити далеко више.
- У процесу сагоревања највећим делом се понаша као инертан, а један део се везује са кисеоником образујући азотне оксиде ( $\text{NO}_x$ ).



# Минералне материје

- Смањују удео горивих компоненти, па на тај начин и количину топлоте која се добија сагоревањем горива.
- Отежавају сагоревање.
- Повећавају трошкове одржавања постројења и смањују његов век трајања.
- Повећавају трошкове транспорта.
- Садржај се мења у широким границама (биомаса 1-2 %, угљеви – до 30 %).

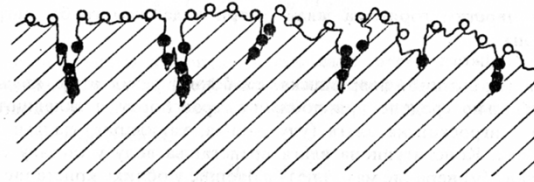


# Пепео

- Представља **смешу оксида минералних материја, који остају после потпуног процеса сагоревања** свих горивих материја из горива и после завршетка свих трансформација минералних материја, које се дешавају на повишеним температурама.



# Влага



Слика 2.2: Шематски приказ грубе, хигроскопске и конституционе влаге

- Смањује количину топлоте која се ослобађа при сагоревању горива, јер се део топлоте троши на њено испаравање.
- Снижава температуру продукта сагоревања.
- Јавља се у три вида:
  - груба  $W_G$  – спољашња, површинска, слободна,
  - хигроскопска  $W_H$  – унутрашња, капиларна, и
  - конституциона – хемијски везана.



# Техничка анализа горива

- Поред елементарне анализе, која је неопходна за читав низ топлотних прорачуна, **за оцену могућности примене једног горива**, а нарочито чврстих, користи се **техничка анализа горива**.
- Заснива се на термичком разлагању масе горива по **два критеријума**:
  - **критеријуму испарљивости**
  - **критеријуму горивости.**



# Техничка анализа горива

- Подаци техничке анализе су:
  - садржај **негоривих испарљивих материја** – садржај **грубе и хигроскопске влаге**,
  - садржај **горивих испарљивих материја** – садржај **волатила**,
  - садржај **негоривих неиспарљивих материја** – садржај **минералних материја**,
  - садржај **горивих и негоривих неиспарљивих материја** – садржај **коксног остатка**.

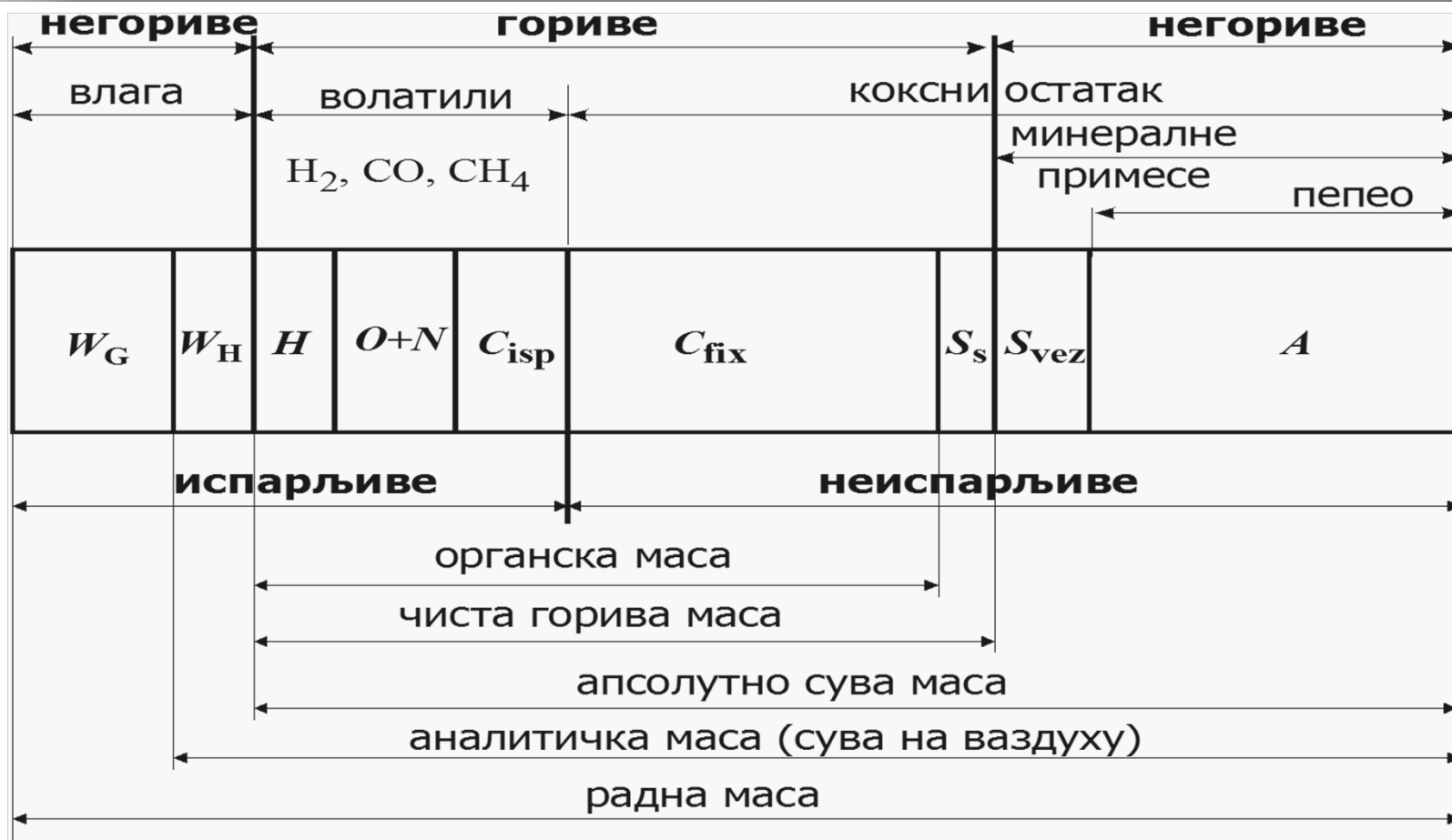


# Условне масе горива

- У зависности од елементарног састава, гориво се условно дефинише различитим масама:
  - радна маса (as received),
  - аналитичка маса (сува на ваздуху – air dried),
  - апсолутно сува маса (dry или moisture free)
  - чиста горива маса (dry ash free),
  - органска маса.



# Условне масе горива







# Условне масе горива – радна маса

- Гориво које се користи за сагоревање у котловима или пећима налази се у стању радне масе горива и његов састав се представља као

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_g^r + A^r + W_H^r + W_G = 100 \quad [\%]$$



# Условне масе горива – аналитичка маса

- Испитивања у лабораторијским условима врше се на узорку који је сув на ваздуху (одстрањена груба влага) и то је аналитичка маса горива чији се елементарни састав изражава као

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S_g^a + A^a + W_H^a = 100 \quad [\%]$$



# Условне масе горива – апсолутно сува маса

- Гориво без влаге (одстрањена хигроскопска влага сушењем на 105 – 110 °C у трајању од 2 сата) представља апсолутно суву масу горива

$$C^s + H^s + O^s + N^s + S_g^s + A^s = 100 \quad [\%]$$



# Условне масе горива – чиста горива маса

- Гориво без влаге и пепела представља сагорљиву масу, без обзира што у њен састав улазе кисеоник и азот који нису гориви
- Састав чисте гориве масе је

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S_g^g + = 100 \quad [\%]$$



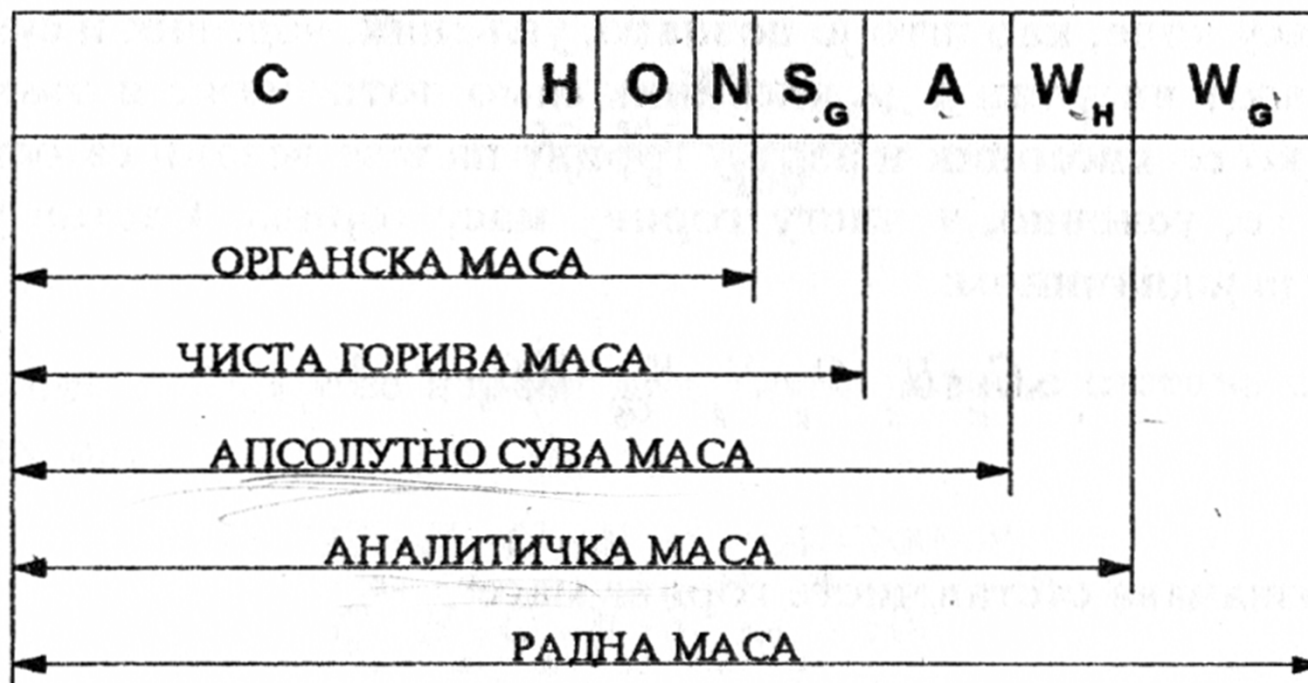
# Условне масе горива – органска маса

- Угљеник, водоник, кисеоник, азот и органски сумпор су елементи који потичу из праматерије од које је гориво настало и чине органску масу горива

$$C^o + H^o + O^o + N^o + S^o + = 100 \quad [\%]$$



# Прерачунавање са једне на другу масу



Слика 2.3: Шемајски приказ условних маса горива



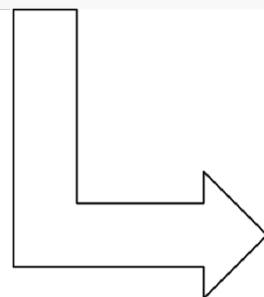
# Прерачунавање са једне на другу масу

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_g^r + A^r + W_H^r + W_G = 100 \quad [\%]$$

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S_g^a + A^a + W_H^a = 100 \quad [\%]$$

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_g^r + A^r + W_H^r = 100 - W_G \quad [\%]$$

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S_g^a + A^a + W_H^a = 100 \quad [\%]$$



$$\frac{X^r}{X^a} = \frac{100 - W_G}{100}$$



# Прерачунавање са једне на другу масу

$$X^r = \frac{100 - W_G}{100} \cdot X^a$$

$$X^g = \frac{100^a}{100 - W_H^a - A^a} \cdot X^a$$

$$X^s = \frac{100}{100 - W_H^a} \cdot X^a$$

$$X^o = \frac{100}{100 - W_H^a - A^a - S_g^a} \cdot X^a$$





# Топлотна моћ

- Количина топлоте која се ослобађа при **потпуном сагоревању** јединице количине (масе, запремине, 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 масе горива под следећим условима:
  - Угљеник и сумпор из горива су сагорели у своје диоксиде, при чему није дошло до сагоревања азота.
  - Продукти сагоревања су охлађени на температуру коју је гориво имало пре почетка сагоревања (20 °C).
  - Вода из продукта сагоревања која потиче од влаге из горива и сагорелог водоника је преведена у течно стање.



# Доња топлотна моћ

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



# Разлика 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, кондензује (из гасовитог пређе у течно стање).
- Топлота испаравања воде 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

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

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



# Рачунско одређивање топлотне моћи течних горива на основу познате густине

$$H_d = 52,92 - 11,93 \cdot \rho_{15} - 0,29 \cdot S$$

(MJ/kg)





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

$$H_g = \sum_{i=1}^n r_i H_{g,i} = 12,75 \cdot r_{H_2} + 12,62 \cdot r_{CO} + 39,81 \cdot r_{CH_4} + 63,42 \cdot r_{C_2H_4} + \dots$$

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

$$H_d = \sum_{i=1}^n r_i H_{d,i} = 10,78 \cdot r_{H_2} + 12,62 \cdot r_{CO} + 35,87 \cdot r_{CH_4} + 59,48 \cdot r_{C_2H_4} + \dots$$



# Прерачунавање топлотних моћи са једне условне масе на другу

$$H_{gr} = H_{ga} \frac{100 - W_G}{100}$$

$$H_{dr} = H_{da} \frac{100 - W_G}{100} - 25 \cdot W_G$$

$$H_{gs} = H_{ga} \frac{100}{100 - W_{Ha}}$$

$$H_{ds} = (H_{da} + 25 \cdot W_{Ha}) \frac{100}{100 - W_{Ha}}$$

$$H_{gg} = H_{ga} \frac{100}{100 - W_{Ha} - A_a}$$

$$H_{dg} = (H_{da} + 25 \cdot W_{Ha}) \frac{100}{100 - W_{Ha} - A_a}$$



# Основи сагоревања

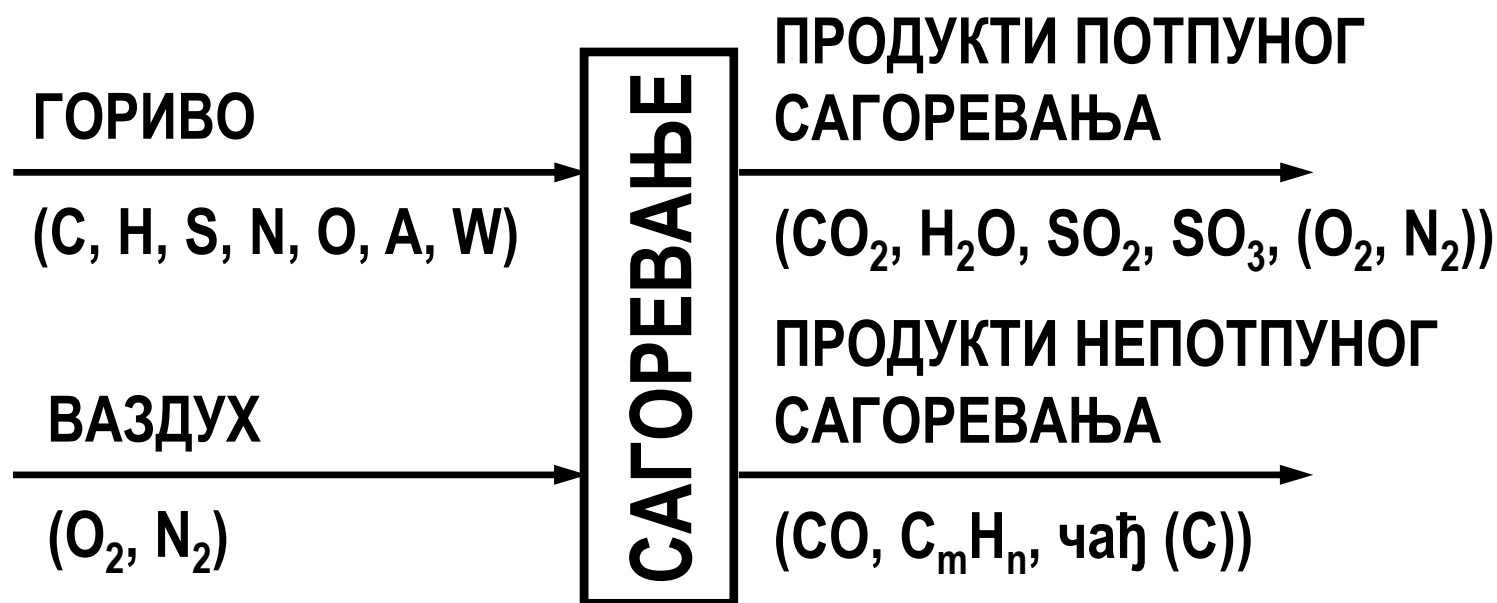


# Сагоревање

- 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.

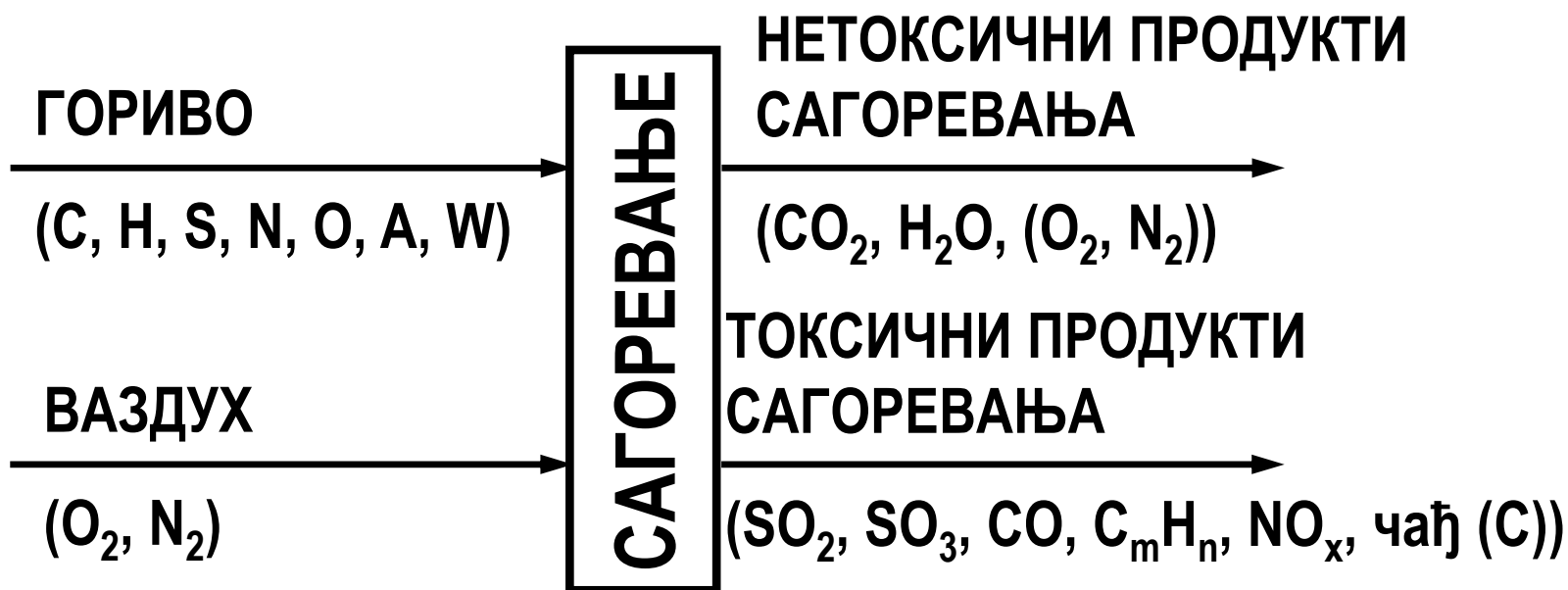


# Продукти сагоревања – класификација по критеријуму потпуности сагоревања





# Продукти сагоревања – класификација по критеријуму ТОКСИЧНОСТИ





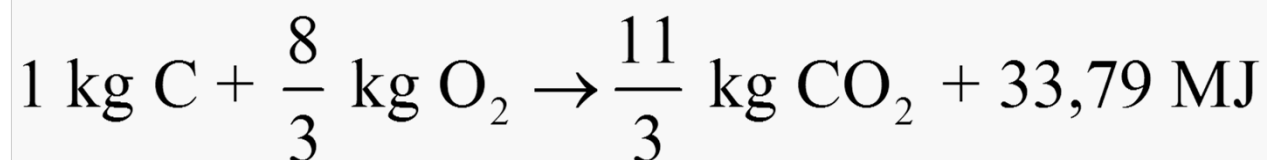
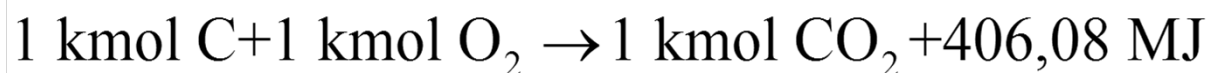
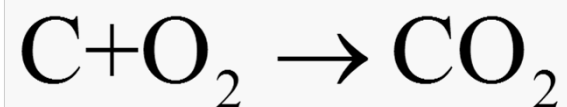
# Стехиометријске једначине дефинишу



- 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.



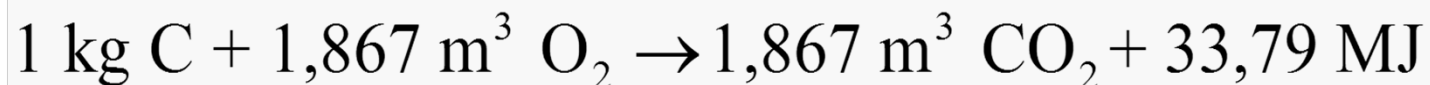
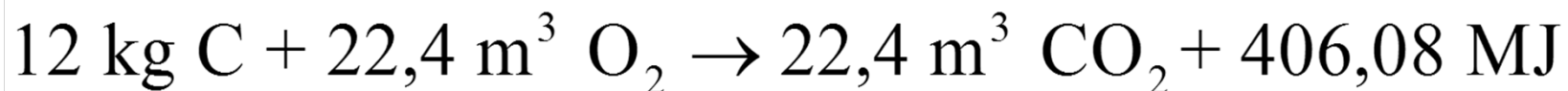
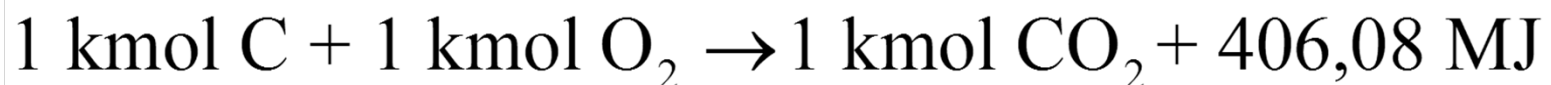
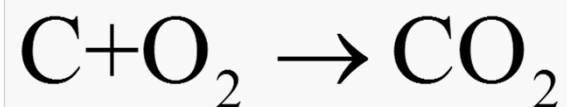
# Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника





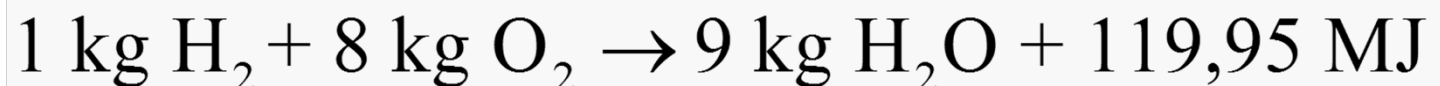
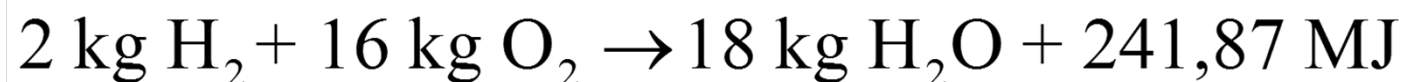
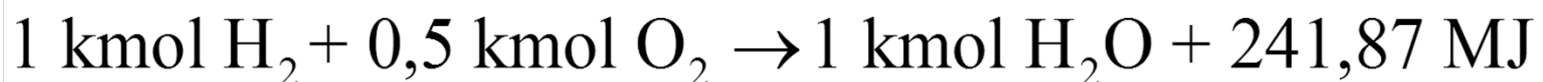
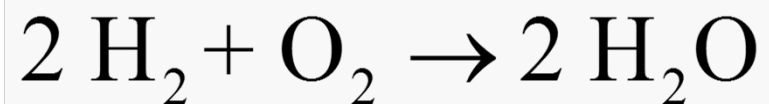


# Стехиометријска једначина потпуног сагоревања угљеника ✓



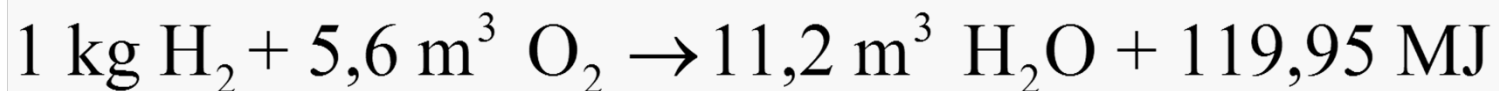
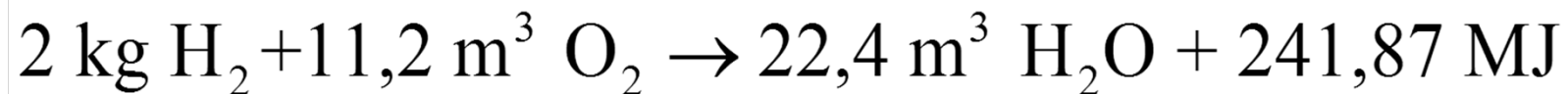
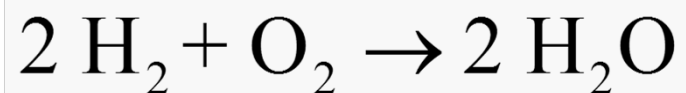


# Стехиометријска једначина сагоревања водоника



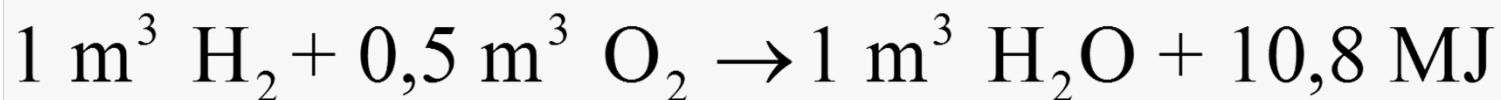
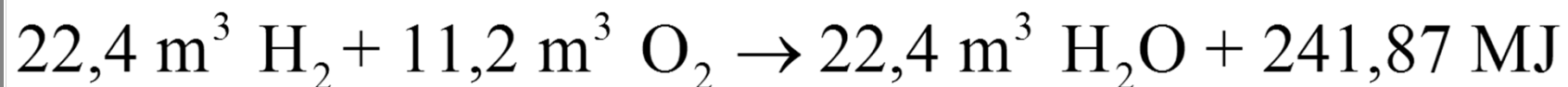
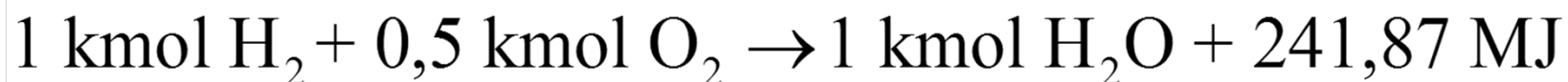
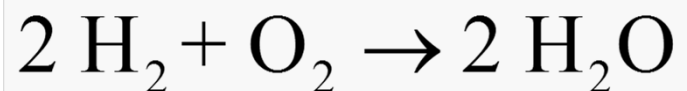


# Стехиометријска једначина сагоревања водоника



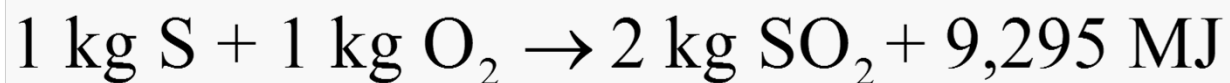
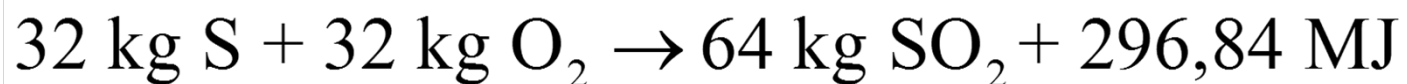
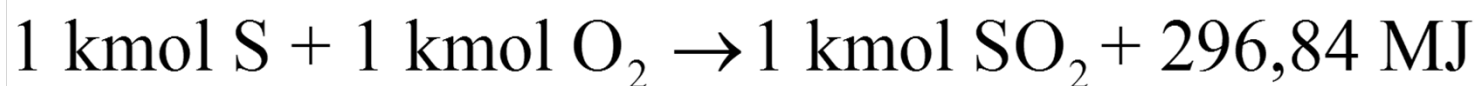
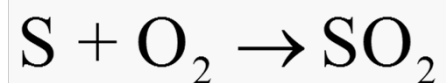


# Стехиометријска једначина сагоревања водоника



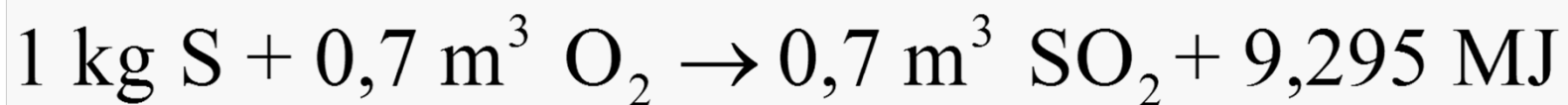
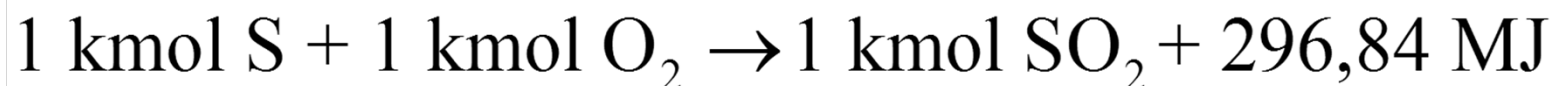
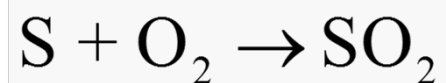


# Стехиометријска једначина сагоревања сумпора





# Стехиометријска једначина сагоревања сумпора





# Теоријска количина кисеоника за потпуно сагоревање

$$O_{\min} \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = 1,867 \cdot g_{\text{C}} + 5,6 \cdot g_{\text{H}} + 0,7 \cdot g_{\text{S}} - 0,7 \cdot g_{\text{O}}$$

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

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

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

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

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

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



# Одређивање теоријске количине ваздуха

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

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

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





# 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 продуката сагоревања

$$V_{\text{CO}_2} \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = 1,867 \cdot g_{\text{C}}$$

$$V_{\text{SO}_2} \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = 0,7 \cdot g_{\text{S}}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = 11,2 \cdot g_{\text{H}} + 1,24 \left( g_{\text{W}} + g_{\text{W}_1} \right)$$

$$V_{\text{O}_2} \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = 0,21 (\lambda - 1) L_{\text{min}}$$

$$V_{\text{N}_2} \left( \text{m}^3 / \text{kg} \right) = 0,8 \cdot g_{\text{N}} + 0,79 L$$

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

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



# Састав продуката сагоревања

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

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

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

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

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

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

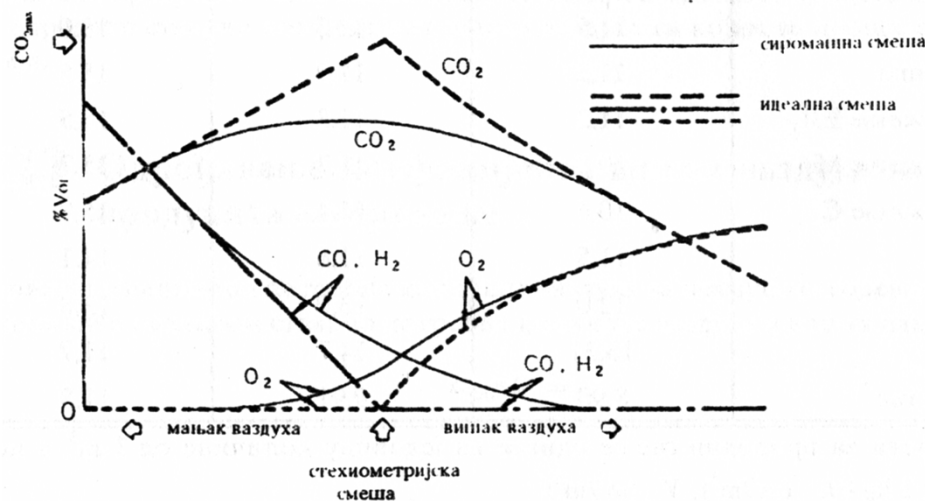
$$O_{2s} (\%v / v) = \frac{V_{O_2}}{V_s} 100$$

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

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



# Одређивање коефицијента вишка ваздуха из састава продукта сагоревања



Слика 3.4: Састав теоријских и стварних продуката сагоревања

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



# 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



# Температура сагоревања (како се израчунава)

- то се математички изражава:

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

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

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

Напомена:  $h_G$  и  $h_{\text{vaz}}$  се занемарују!



# 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

$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$



# 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

$$t_s = \frac{H_d + L \cdot h_v + h_G - Q_d}{\sum V_i \cdot c_{pmi} \Big|_0^{t_s}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$





# 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

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