



# Сагоревање Б

Изборни; Позиција 5.4.5; 6 ЕСПБ

Извођачи наставе:

Проф. др Драгослава Стојиљковић

др Небојша Манић, доцент

др Владимир Јовановић, доцент



## Основне информације

- Бодови (Предиспитне обавезе 60 + Усмени 40)
 

• 2 теста	2x10	20
• 2 колоквијума	2x10	20
• задаци	3x5	15
• похађање наставе		5
- Термини
 

• T1-K1	27. новембар
• T2-K2	25. децембар
• T1/2-K1/2	према договору
- Информације: <http://nastava.mas.bg.ac.rs/nastava/>
- Консултације
 

• четвртак	12-13 h
------------	---------



# ДЕО 1

## Гориве материје

### ГОРИВА



## 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.
- ...

5



## Гориво



6





## 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

7



## Горива

### Фосилна горива

### Обновљива горива

#### Природна

#### Произведена

#### Природна

#### Произведена

Чврста

тресет  
угаљ  
гориви шкриљци

Чврста

брикети  
кокс

Чврста

дрвна биомаса  
пољопривредна биомаса  
алге

Чврста

дрвени угаљ  
брикети  
пелети  
торификовани пелети/брикети

Течна

нафта

Течна

моторни бензин  
дизел гориво  
уља за ложење  
петролеј  
керозин

Течна

Течна

биометанол  
биоетанол  
биодизел  
биотечности

Гасовита

барски гас  
јамски гас  
природни земни гас

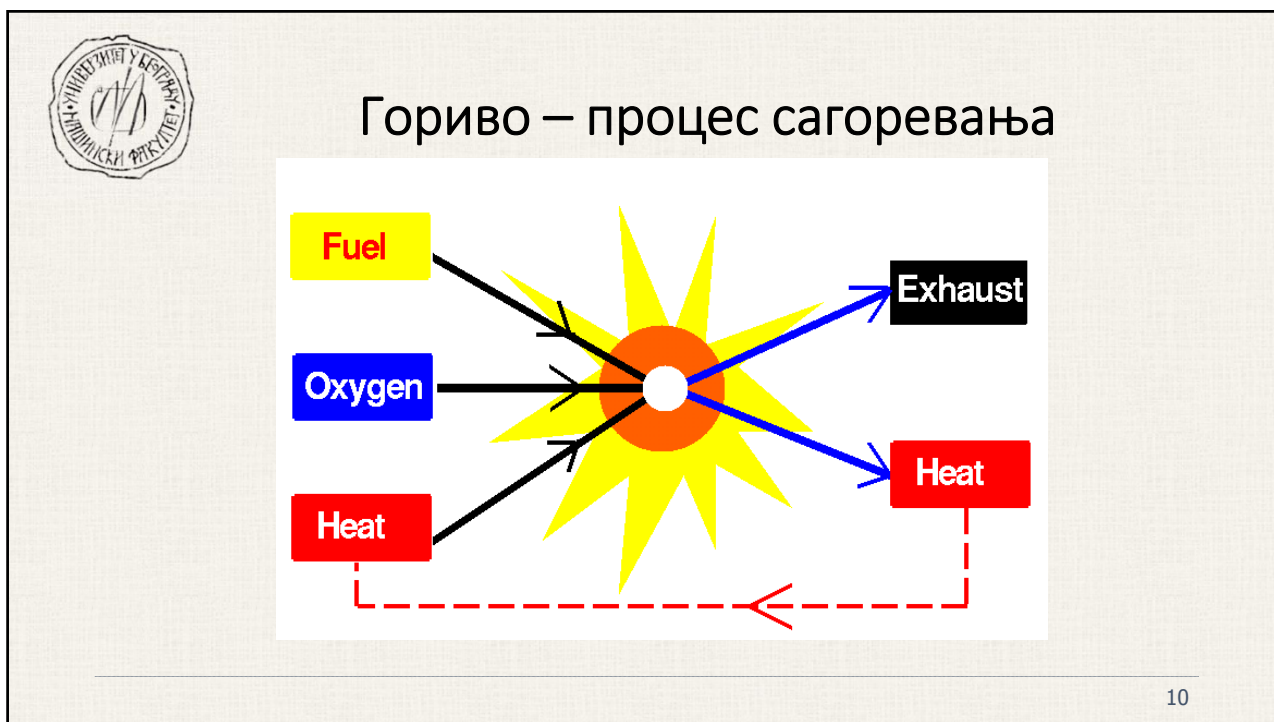
Гасовита

дестилациони гас  
рафинеријски гас  
течни нафтни гас  
генераторски гас

Гасовита

Гасовита

биогаз  
водоник





## Састав горива

### Елементарна анализа

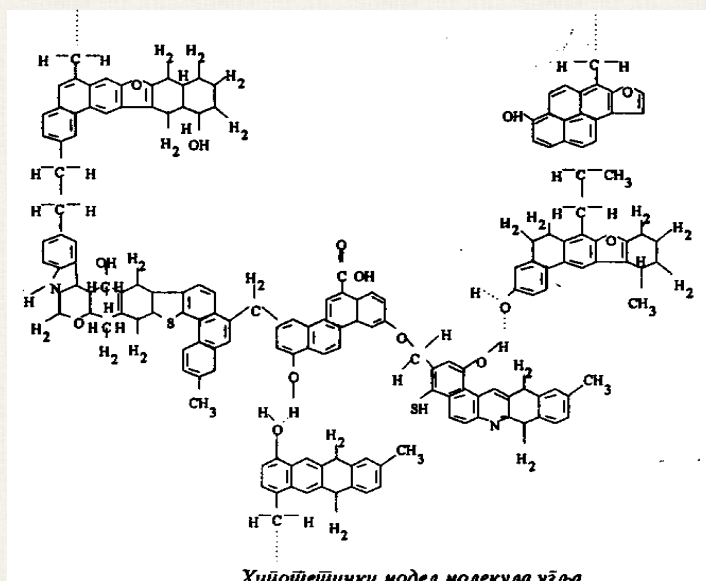
- Гориви елементи:
  - C, H, S
- Баласт
  - Унутрашњи: O, N
  - Спољашњи: A, W

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

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

gi – масено учешће

11



12





## Угљеник

- Најважнија компонента горива – има га највише и његовим сагоревањем настаје највећи део количине топлоте коју гориво ослобађа.
- Налази се у следећим облицима:
  - слободан
  - везан у сложеним органиским 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.

13



## Водоник

- Друга компонента по важности
- Налази се у следећим облицима:
  - везан - код чврстих, течних и гасовитих горива
  - чист - мешавина 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.

14



## 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 делује кородивно и утиче на загађење животне средине.

15



## Кисеоник

- Није гориви елемент, али помаже и омогућава сагоревање.
- Налази се у следећим облицима:
  - везан са другим елементима
  - слободан - у гасовитим горивима у мањим количинама.
- Смањује потребну количину кисеоника за сагоревање.

16





## Азот

- Јавља се у виду сложених органских једињења
- У чврсим 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 (NO<sub>x</sub>).

17



## Минералне примесе

- 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 (9) %, угљеви – до 30 %).

18



## Минералне примесе

- Састоје се из:
  - Примарних – потичу још из праматерије, соли алкалних и земноалкалних метала – калијума, калцијума, магнезијума
  - Секундарних – доспеле су у гориво током његовог настајања
  - Терцијарних – доспеле у гориво током његовог вађења и транспорта.

19



## Пепео

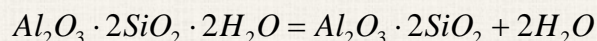
- Представља смешу оксида минералних материја, који остају после потпуног процеса сагоревања свих горивих материја из горива и после завршетка свих трансформација минералних материја, које се дешавају на повишеним температурама.

20

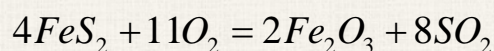


## Трансформације минералних примеса

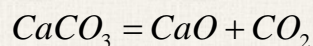
- Алуминосиликати губе кристалну воду



- Пирит сагорева



- Карбонати се разлажу

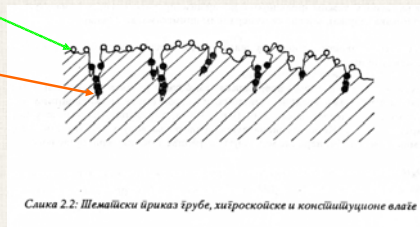


21



## Влага

- Смањује количину топлоте која се ослобађа при сагоревању горива, јер се део топлоте троши на њено испаравање
- Снижава температуру продуката сагоревања
- Јавља се у три вида
  - Груба WG – спољашња, површинска, слободна
  - Хигроскопска WH – унутрашња, капиларна
  - Конституциона (хидратна или кристализациона) – хемијски везана.



Слика 2.2: Шематски приказ грубе, хигроскопске и конституционе влаге

22





## Техничка анализа горива

- Заснива се на термичком разлагању масе горива по два критеријума:
  - критеријуму испарљивости
  - критеријуму горивости.

23



## 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 пепела
  - Садржај горивих и негоривих неиспарљивих материја – садржај коксног остатка.

24



## Условне масе горива

- У зависности од елементарног састава, гориво се условно дефинише различитим масама:
  - Радном
  - Аналитичком
  - Апсолутно сувом
  - Чистом горивом
  - Органском.

25



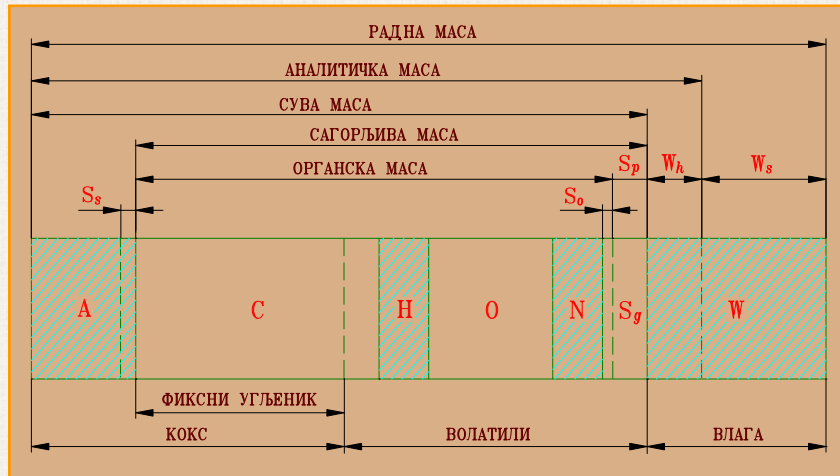
## Условне масе горива

- Радна маса  $C_r + H_r + O_r + N_r + S_r + A_r + W_{Hr} + W_G = 100\%$
- Аналитичка маса  $C_a + H_a + O_a + N_a + S_a + A_a + W_{Ha} = 100\%$
- Апсолутно сува маса  $C_s + H_s + O_s + N_s + S_s + A_s = 100\%$
- Чиста горива маса  $C_g + H_g + O_g + N_g + S_g = 100\%$

26



## Условне масе горива



27



## Условне масе горива РАДНА МАСА (*ar – as received*)

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

$$C_r + H_r + O_r + N_r + S_r + A_r + W_{Hr} + W_G = 100\%$$

28





## Условне масе горива АНАЛИТИЧКА МАСА (*ad* – *air dried, as analysed*)

- 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

$$C_a + H_a + O_a + N_a + S_a + A_a + W_{Ha} = 100\%$$

29



## Условне масе горива АПСОЛУТНО СУВА МАСА (*d* - *dry*)

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

$$C_s + H_s + O_s + N_s + S_s + A_s = 100\%$$

30



## Условне масе горива ЧИСТА ГОРИВА МАСА (daf – dry ash free)

- Гориво без влаге и пепела представља чисту гориву масу, без обзира што у њен састав улазе кисеоник и азот који нису гориви.

$$C_g + H_g + O_g + N_g + S_g = 100\%$$

31



## Условне масе горива ОРГАНСКА МАСА

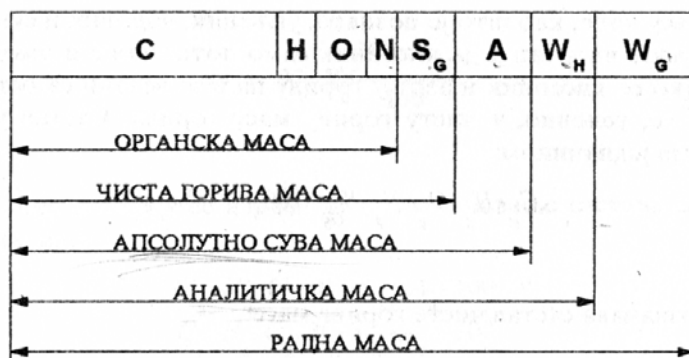
- Угљеник, водоник, кисеоник, азот и органски сумпор су елементи који потичу из праматерије од које је гориво настало и чине органску масу горива

$$C_o + H_o + O_o + N_o + S_o = 100\%$$

32



## Условне масе горива



Слика 2.3: Шематски приказ условних маса горива

33



## Прерачунавање са једне на другу масу

$$C_r + H_r + O_r + N_r + S_r + A_r + W_{Hr} + W_G = 100\%$$

$$C_r + H_r + O_r + N_r + S_r + A_r + W_{Hr} = 100 - W_G$$

$$C_a + H_a + O_a + N_a + S_a + A_a + W_{Ha} = 100\%$$

$$\frac{X_r}{X_a} = \frac{100 - W_G}{100}$$

34





## Прерачунавање са једне на другу масу

$$X_r = X_a \frac{100 - W_G}{100}$$

$$X_g = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha} - A_a}$$

$$X_s = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha}}$$

$$X_o = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha} - A_a - S_{ga}}$$

35



## Топлотна моћ

Количина топлоте која се ослобађа при потпуном сагоревању јединице масе или запремине горива.

36



37



## Топлотна моћ

- Према условима сагоревања
  - $p = \text{const}$
  - $V = \text{const}$
- Према топлотном нивоу продуката сагоревања
  - Горња топлотна моћ  $H_g$
  - Доња топлотна моћ  $H_d$
- Јединица: J/kg, kJ/kg, MJ/kg, J/m<sup>3</sup>, ...

38



## Горња топлотна моћ

- Количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:
  - Угљеник и сумпор из гориве материје налазе се у облику својих диоксида у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло
  - Продукти сагоревања доведени су 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.

39



## Доња топлотна моћ

- Количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:
  - Угљеник и сумпор из гориве материје налазе се у облику својих диоксида у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло
  - Продукти сагоревања доведени су 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.

40





## Веза између горње и доње топлотне моћи

$$H_g = H_d + 25(9H + W)$$

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

41



## Одређивање топлотне моћи горива

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

42



## Рачунско одређивање топлотне моћи горива

- На бази елементарног састава
- VDI обрасци

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

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

43



## Рачунско одређивање топлотне моћи течног горива

- На бази познате густине течног горива на 15 °C и садржаја сумпора

$$H_d = 52,92 - 11,93 \cdot \rho_{15} \quad (\text{MJ/kg})$$

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

44



## Рачунско одређивање топлотне моћи горива

- На основу познатог састава по горивим компонентама

$$H_g = 127,5 \cdot H_2 + 126,2 \cdot CO + 398,1 \cdot CH_4 + 634,2 \cdot C_2H_4 + \dots \quad (\text{MJ/m}^3)$$

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

45



## Прерачунавање топлотних моћи са једне условне масе на другу

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

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

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

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

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

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

46