

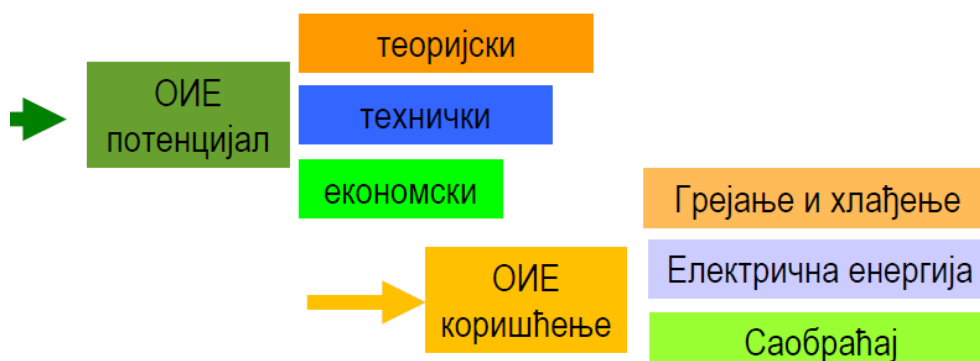
# 1 УВОД

Светски изазов који се поставља у сектору енергетике, како краткорочно тако и дугорочно, односи се на могућности задовољења потреба за енергијом и то због ограничених резерви фосилних горива (угаљ, нафта и природни земни гас), сталног пораста броја становника и нових потреба за енергијом. Статистички подаци указују да потрошња енергије у свету већ стотину и више година експоненцијално расте. Овај тренд потрошње енергије имао је само два прекида и то за време Првог и Другог светског рата. Сва предвиђања потрошње енергије у свету указују на повећање потрошње енергије и потребе за коришћењем и других изора енергије, поред фосилних горива.

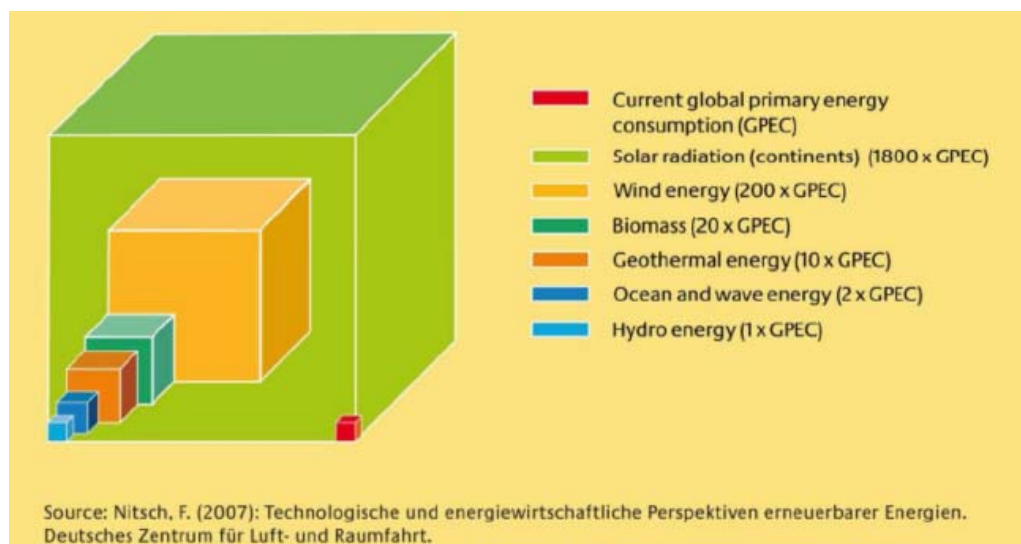
Стратегије енергетике указују да енергетски сектор мора да се трансформише, како због ограничених резерви фосилних горива, тако и због њиховог утицаја на животну средину – великом доприносу загађењу животне средине и утицају на глобално загревање, односно климатске промене.

Једна од могућности за решавање обезбеђивања довољне количине енергије представља коришћење обновљивих извора енергије. Према Директиви 2009/28/ЕЗ о промоцији коришћења енергије из обновљивих извора енергије, енергија из обновљивих извора се дефинише као енергија из нефосилних обновљивих извора и то: енергија ветра, соларна, аеротермална, геотермална, хидротермална, енергија океана, хидроенергија, биомаса, депонијски гас, гас из постројења за обраду отпада и биогаз.

Потенцијал обновљивих извора енергије који може да се користи у енергетске сврхе (Слика 1.1) може да се дефинише на као: теоријски (укупна количина која је расположива за коришћење), технички (количина која се са расположивим технологијама може користити на ефикасан и еколошки прихватљив начин) и економски (количина која је економски исплатива за коришћење у сектору енергетике). Биомаса која се користи у енергетске сврхе може се користити у: сектору грејања и хлађења, сектору електричне енергије и у сектору саобраћаја. Процена расположивих потенцијала обновљивих извора енергије и бруто финална потрошња енергије у свету приказани су на Слици 1.2.



Слика 1.1: Потенцијали обновљивих извора енергије и могућности коришћења у сектору енергетике



Слика 1.2

Биомаса је биоразградиви део производа, отпада и остатака биолошког порекла из пољопривреде (укључујући биљне и животињске материје), шумарства и повезаних индустрија, укључујући рибарство и аквакултуру, као и биоразградиви део индустријског и комуналног отпада (Директива 2009/28/EЗ). Коришћење биоенергије (енергије добијене из биомасе) може се разматрати на два начина и то: „традиционално“ и „савремено“. Традиционално коришћење односи се на класично сагоревање биомасе – сагоревање огревног дрвета (цепанице дрвета), производња и коришћење дрвеног угља. Под савременим коришћењем подразумевају се модерне технологије добијања горива и енергије из биомасе (нпр. биогорива); био-рафинерије; биогаз произведен анаеробном дигестијом остатака; системи за загревање коришћењем дрвених пелета; и друге технологије.

Биомаса ће представљати значајан извор енергије у будућности. Основне предности примене биомасе у односу на фосилна горива су:

- обновљив извор енергије
- смањење зависности од фосилних горива
- сигурност снабдевања
- смањење загађења животне средине
- смањење емисије CO<sub>2</sub>
- отварање радних места
- развој на локалном/националном нивоу и др.

Примена биомасе у енергетске сврхе мора се користити тако да не угрози ланац исхране, као и да задовољи критеријуме одрживости (детално ће бити приказано у наредним поглављима).

У сектору енергетике, биомаса може да се користи на различите начине, а у будућности се може очекивати и развој нових технологија које су у овом тренутку у развоју или које ће тек бити развијен.

У наредним поглављима, основне карактеристике горивих материја и процеса сагоревања биће приказани, а затим ће бити дефинисани појам, облици и подела биомасе. Посебно ће бити приказане могућности коришћења биомасе у енергетске сврхе и технологије које омогућавају коришћење биомасе на ефикасан и еколошки прихватљив начин.

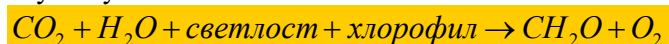
## 2 ГОРИВЕ МАТЕРИЈЕ

Све појаве и процеси у природи представљају различите облике кретања материје. Сваки облик кретања материје испољава се одговарајућим видом енергије. Различитим видовима кретања материје одговарају различити видови енергије.

Под обновљивим изворима енергије подразумевају се: биомаса, хидропотенцијал (енергија водотокова), соларна енергија, енергија ветра, геотермална енергија и отпад (само одређене врсте отпада).

Биомасу човек користи од давнина за различите сврхе: за сопствену исхрану, за исхрану стоке, као грађевински материјал, као сировину за производњу одеће и као извор енергије (за припрему хране и за грејање).

Под појмом биомаса подразумевају се све биљке на копну и у води које претварају  $\text{CO}_2$ , воду и соларну енергију у органску масу:



Биомаса, такође, обухвата и организме који се хране биљкама, као и разне разграђиваче – укључујући и бактерије и гљиве – које трансформишу биљке и животиње и њихове органске остатке поново у воду и  $\text{CO}_2$ .

Сагоревањем биомасе,  $\text{CO}_2$  се враћа у атмосферу, тако да је укупни биланс  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2$  потребан за раст биљака и  $\text{CO}_2$  настао њиховим сагоревањем) једнак нули. Наравно, овај биланс не узима у обзир целокупни биланс  $\text{CO}_2$  који би подразумевао и емисију  $\text{CO}_2$  која потиче из процеса обраде земљишта приликом узгајања биљака, сече и сакупљања, превозиње у облик погодан за процес сагоревања и др. Одређивање целокупног биланса  $\text{CO}_2$  од узгајања биомасе до крајње примене врши се на основу сложених модела који узимају у обзир велики број различитих утицајних фактора.

## 2.1 ПОЈАМ ГОРИВА

Гориве материје представљају такве суптанце које сагоревањем – процесом бурног сједињавања са кисеоником, поред материјалних продуката процеса (продуката сагоревања), ослобађају одређену количину топлоте. Дефиниција која је дата на данашњем степену развоја, допуњена је низом захтева, који гориво мора да испуни. Једна материја може да се користи као индустријско гориво под условом да испуњава следеће захтеве:

- да процесом сагоревања производи знатну количину топлоте у кратком временском размаку;
- да се у природи налази у довољним количинама;
- да је експлоатација релативно лака и економична;
- да је производни поступак технички остварљив и рентабилан;
- да у себи не садржи неприхватљиво велику количину негоривих материја – баласта;
- да битно не мења свој састав и особине при складиштењу, транспорту и руковању;
- да је безбедна с обзиром на појаву пожара и експлозије у условима складиштења, транспорта и руковања;
- да је цена произведене количине топлоте економична и прихватљива; и
- да су настали продукти сагоревања безопасни по жива бића и примењене материје.

## 2.2 ВРСТЕ ГОРИВА

Општа подела горива врши се најчешће према њиховом агрегатном стању и према начину добијања. Према агрегатном стању горива се дела на чврста, течна и гасовита, а прма начину добијања – на природна и прерађена. Под природним горивима подразумевају се она горива које се налазе у природи и која се могу користити већ после одстрањивања грубих примеса. Прерађена горива добијају се или прерадом природних или процесом у коме учествују и природна и вештачка горива. Општа подела горива дата је у Табели 2.1.

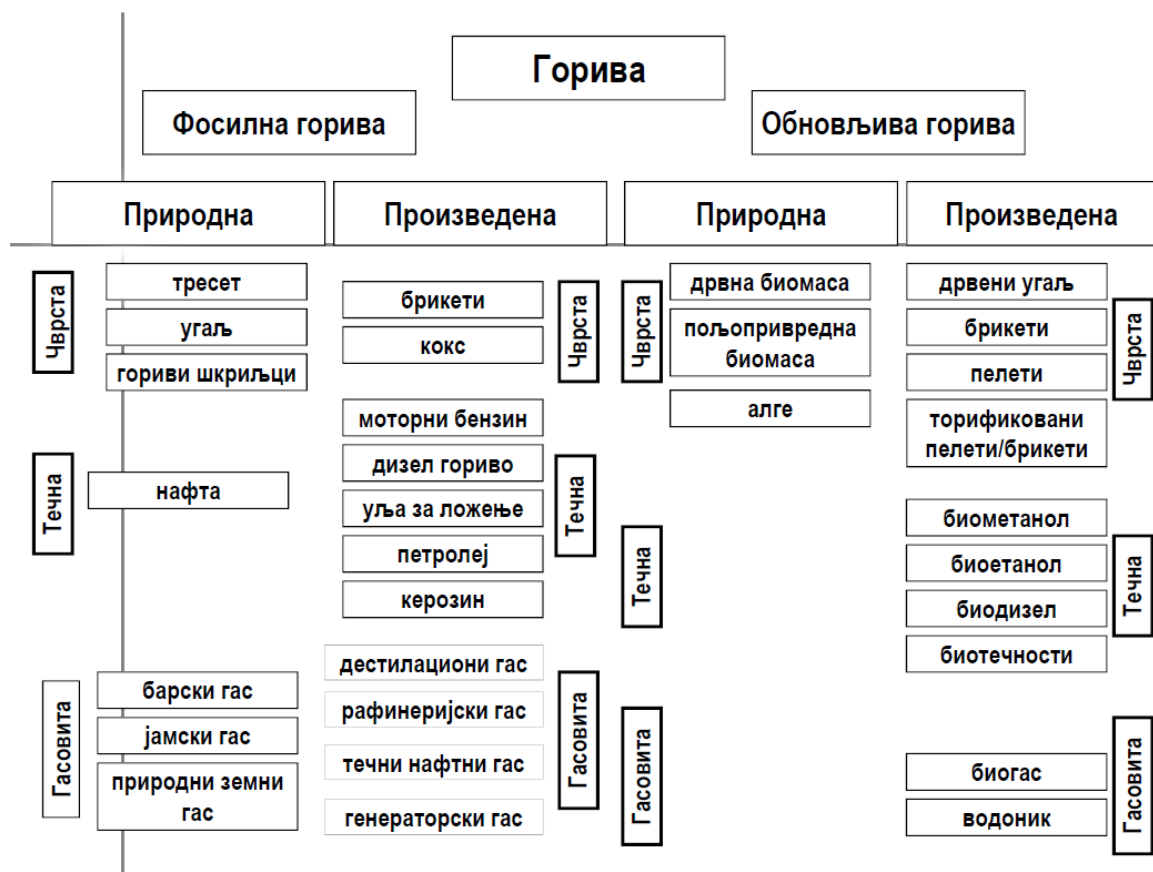
Поред ове опште поделе, горива се могу разврстати:

- према постојаности на толоту (топлостостојана и топлонепостојана);
- према карактеру коришћења (енергетска и технолошка горива);
- према запаљивости (самозапаљива и несамозапаљива);
- према примени.

Табела 2.1: Подела горива према агрегатном стању и степену прераде

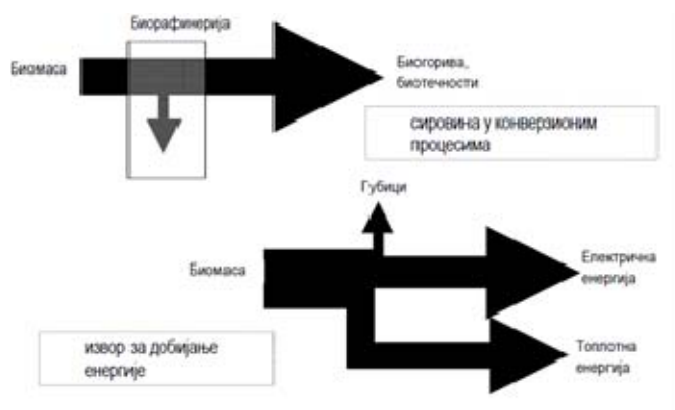
Према агрегатном стању	Према степену прераде	
	ПРИРОДНА ГОРИВА	ПРЕРАЂЕНА ГОРИВА
Чврсто	биомаса	дрвени угаљ, брикети, сечка, пелети, торификовани пелети
Течно		биогорива (биоетанол, био-ЕТБЕ, биометанол, био-МТБЕ, био-ДМЕ, био-ТАЕЕ, биобутанол, биодизел, Fischer-Tropsch дизел, хидрогенизована биљна уља, чисто биљно уље), биотечности.
Гасовито		биогаз, водоник.

У данашње време, подела горива, посебно, врши се по критеријуму обновљивости. По овом критеријуму, горива се деле на необновљива (фосилна) и обновљива горива, а додатно се могу поделити и по пртходним критеријумима – према агрегатном стању и степену прераде (Слика 2.1).



Слика 2.1: Врсте горива

Горива данас представљају, са једне стране, сировину у многим конверзионим процесима (за добијање прерађених горива) и, са друге стране, као и извор за добијање топлотне или неке друге енергије (Слика 2.2). Савремени концепти примене биомасе указују на могућност коришћења биомасе као сировине у посебним постројењима – биорафинеријама, која ће омогућити да се поред различитих врста горива из биомасе произведу различите материје (биоматеријали, биохемикалије и др.). Концепт биорафинерије је развијен по аналогији са савременим рафинеријским постројењима за прераду нафте, али би број различитих производа који се добија у биорафинерији био знатно већи.



Слика 2.2: Примери примене биомасе у различитим процесима

## 2.3 САСТАВ ГОРИВА

Састав горива одређује се такозваном елементарном анализом, а особине, важне за примену – техничком анализом.

### 2.3.1 ЕЛЕМЕНТАРНИ САСТАВ

Састав чврстих и течних горива изражава се у масеним, а гасовитих у запреминским процентима. У општем случају горива се састоје из горивог дела и баласта – негоривог дела. На основу познатог елементарног састава може се прорачунати низ података: потребна количина ваздуха за потпуно сагоревање, топлотна моћ горива, количина и састав продуката сагоревања и температура сагоревања.

У састав било ког горива, у општем случају, улазе три горива елемента – угљеник, водоник и сумпор, као примесе кисеоник и азот (унутрашњи баласт), и баласт: минералне материје и вода (спољни баласт). На основу овога, може се написати састав горива у општем облику:

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

где се са  $g$  обележава масено учешће појединих елемената у гориву, а  $C, H, S, O, N, W, A$  представљају симболе за угљеник, водоник, сумпор, кисеоник, азот, влагу и минералне материје; или у облику

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

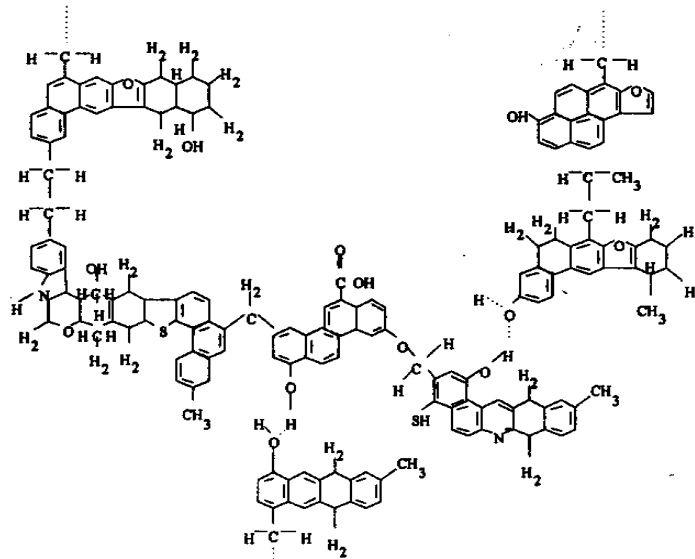
где се истим симболима изражава процентуални састав\*.

Овакав елементарни састав је општи и важи за сва горива. Зависно од врсте горива он се мења: у гасовитим горивима не постоје минералне материје, а и у већини течних горива, минералних материја практично нема, док их код чврстих горива увек има. Садржај минералних материја код угљева је већи и зависи од врсте угља, док је у биомаси значајно мањи.

#### 2.3.1.1 Угљеник

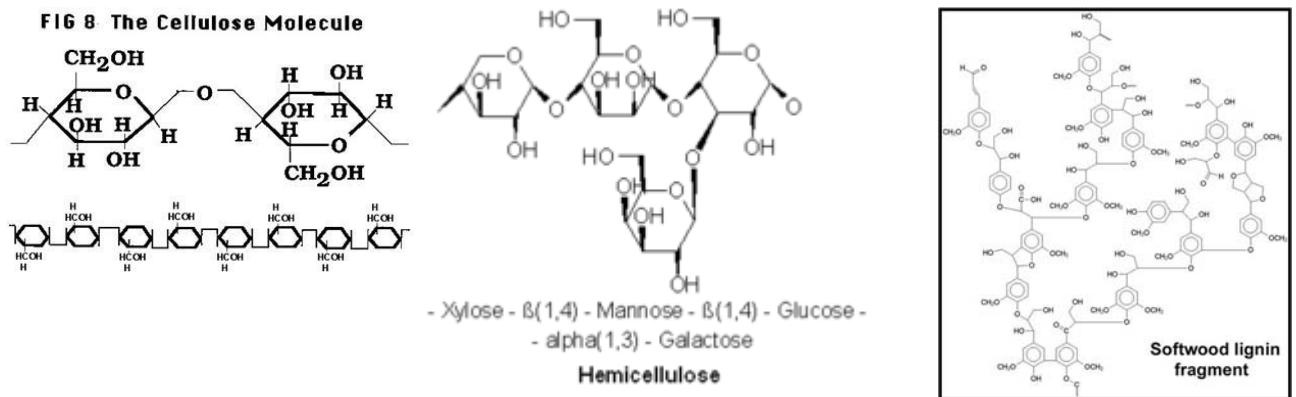
Угљеник чини најважнију компоненту горива с једне стране што га у гориву има највише, а с друге стране што његовим сагоревањем настаје и највећи део количине топлоте коју гориво ослобађа. Угљеник се у горивима налази и у слободном стању и везан; он улази у састав сложених органских једињења везан са водоником, кисеоником, азотом и сумпором (Слике 2.3 и 2.4). Сагоревањем једног килограма угљеника ослобађа се количина топлоте од 33,829 MJ. Максимална температура сагоревања угљеника из горива рачуната без топлотних губитака износи 2240 °C.

\* Напомена: Симбол  $W$  потиче из енглеског, немачког језика (water, Wasser), а  $A$  - из енглеског, немачког језика (ash, Asche).



Хијотейички модел молекула угља

Слика 2.3 Макромолекул угља



Слика 2.4 Макромолекули целулозе, хемицелулозе и лигнина (основни састојци биомасе)

### 2.3.1.2 Водоник

Водоник представља другу по важности гориву компоненту. Као и угљеник, потиче из праматерије, из које је гориво настало. Водоник се у горивима јавља везан код чврстих, течних и гасовитих, и чист, у мешавини са другим горивим компонентама, у гасовитим горивима. При сагоревању једног килограма водоника развија се чак 142,014 MJ или 4,2 пута више од одговарајуће количине топлоте код угљеника. Зато количина топлоте, која се ослобађа потпуним сагоревањем јединице масе горива расте са повећањем садржаја водоника у њему. Максимална температура сагоревања водоника, рачуната без топлотини губитака, износи 2235 °C.

### 2.3.1.3 Кисеоник

Кисеоник није гориви елемент, али помаже и омогућава сагоревање. У горивима се јавља везан са другим елементима, сем у гасовитим, где га налазимо у слободном стању (у мањим количинама). Количина кисеоника у гориву смањује потребну количину кисеоника из ваздуха неопходну за његово сагоревање (код алкохола, на пример). Улази у такозвани унутрашњи баласт, јер заузима место горивим елементима и што у оксидованом стању са угљеником и водоником смањује количину топлоте која се ослобађа сагоревањем. Висок садржај кисеоника налази се у биомаси, тресету и младим мрким угљевима; знатно мањи је код старијих угљева.

#### 2.3.1.4 Азот

Азот се у горивима јавља у саставу сложених органских једињења. У чврстим и течним горивима га има веома мало (0-2%), док га код гасовитих горива може бити далеко више (нарочито код произведених). У процесу сагоревања горива азот се највећим делом понаша као инертан. Заједно са кисеоником чини такозвани унутрашњи баласт.

#### 2.3.1.5 Сумпор

Сумпор се у горивима јавља у виду горивог и негоривог. Негориви сумпор (у облику сулфата гвожђа, калцијума и др.) током сагоревања прелази у пепео и не утиче на својства горива. Гориви сумпор се јавља као органски (у оквиру сложених органских једињења, меркаптана) и пиритни (сједињен са гвожђем,  $\text{FeS}_2$ ). И поред тога што сагоревањем сумпора настаје одређена количина топлоте (9,295 MJ/kg) присуство сумпора у горивима је крајње непожељно. Сумпор делује кородивно и у елементарном стању и у облику једињења, а продукти његовог сагоревања су штетни за живи свет. При сагоревању сумпора са вишком ваздуха (већом количином ваздуха од неопходно потребне за потпуно сагоревање) долази до настајања сумпор-диоксида и сумпор-триоксида ( $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ ) који у присуству воде образују сумпорасту и сумпорну киселину (узрок настајања киселих киша).

#### 2.3.1.6 Минералне материје и пепео

Све врсте горива, осим гасовитих и најлакших фракција прераде нафте, садрже у себи минералне материје. Оне су штетне из више разлога:

- смањују удео горивих материја у гориву, па на тај начин и количину топлоте која се добија сагоревањем,
- отежавају сагоревање и изазивају губитак горива па тиме и топлоте,
- повећавају трошкове одржавања постројења и смањују његов век трајања, и
- повећавају трошкове транспорта горива.

Садржај минералних материја у горивима се мења у широким границама: од неколико процената код тежих течних горива, до неколико десетина процената код чврстих горива (дрвна биомаса – 1-2%, пољопривредна биомаса – 7-10 %, угљеви – до 30%). Даљи ток излагања односиће се на минералне материје у чврстим горивима.

У процесу сагоревања минералне материје трпе низ сложених промена – разлажу се и делимично оксидишу стварајући остатак, који се и квалитативно и квантитативно разликује од полазне материје – пепео.

Тако у саставу пепела налази се низ оксида: калцијума ( $\text{CaO}$ ), магнезијума ( $\text{MgO}$ ), натријума ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), калијума ( $\text{K}_2\text{O}$ ), силицијума ( $\text{SiO}_2$ ), гвожђа ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), алуминијума ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и других.

Пепео, значи, 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.

#### 2.3.1.7 Влага

Заједно са минералним материјама влага чини тзв. спољни баласт или баласт уопште, и као таква је непожељна. Она умањује топлотну моћ горива, јер се на њено испаравање троши се део топлоте настао сагоревањем горивих компоненти горива. Влага снижава температуру продуката сагоревања, а повећава трошкове транспорта. Потиче из праматерије али ипак највећим делом доспева у гориво квашењем.

Влага се у чврстим горивима јавља у три вида: као груба, хигроскопска и конституциона.

Груба влага (спољашња, површинска, слободна) резултат је квашења горива влагом из спољне средине при добијању, транспорту и складиштењу горива (Слика 2.5). Хигроскопска влага

(унутрашња, капиларна) налази се у порама чврстог горива. Конституциона влага представља воду у саставу самог горива хемијски везану (минералне материје) – најчешће у облику кристалне воде.

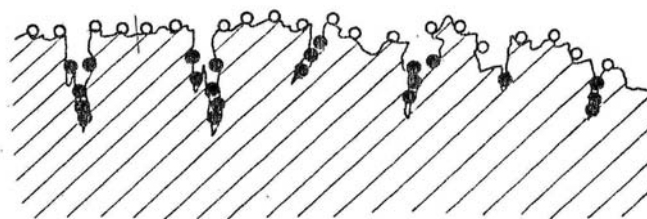
У техничким прорачунима занемарује се садржај конституционе влаге, тако да се укупна влага може представити збиром грубе и хигроскопске, сведено на исту масу горива:

$$W_u = W_G + W_H, \% m/m$$

где су:

$W_u (\%)$	–	укупна влага,
$W_G (\%)$	–	груба влага,
$W_H (\%)$	–	хигроскопска влага.

Између грубе и хигроскопске влаге нема оштре границе – обе су тачније дефинисане условима свог одређивања.



Слика 2.5: Шематски приказ грубе и хигроскопске влаге

## 2.4 ТЕХНИЧКА АНАЛИЗА ЧВРСТИХ ГОРИВА

Поред елементарне анализе, која је неопходна за низ топлотних прорачуна, за оцену могућности адекватне примене једног горива, а нарочито чврстих, користи се такозвана техничка анализа. Техничка анализа се заснива на термичком разлагању масе горива (процесу који прати све видове коришћења чврстих горива) при чему се добијају испарљиве и неиспарљиве материје. С обзиром на сложеност структуре чврстих горива, и у испарљивом и у неиспарљивом делу горива налазе се гориве и негориве компоненте. Ова четири дела (компоненте) горива узимају се за основу техничке анализе, а одговарајућа подела дата је на Слици 2.6.

Основни подаци техничке анализе су:

- садржај грубе влаге и садржај хигроскопске влаге – садржај негоривих испарљивих материја,
- садржај горивих испарљивих материја (волатили), у чијем се саству налазе испарљиви угљеник и водоник (најчешће везани међусобно у облику угљоводоника) и условно кисеоник и азот,
- садржај негоривих неиспарљивих материја – садржај минералних материја (пепела),
- садржај кокосног остатка – горивих и негоривих неиспарљивих материја.

Поред ових карактеристика, подаци техничке анализе су још топлотна моћ, понашање пепела на повишеним температурама (топливост пепела), дужина и боја планема, изглед и структура коксног остатка и др.

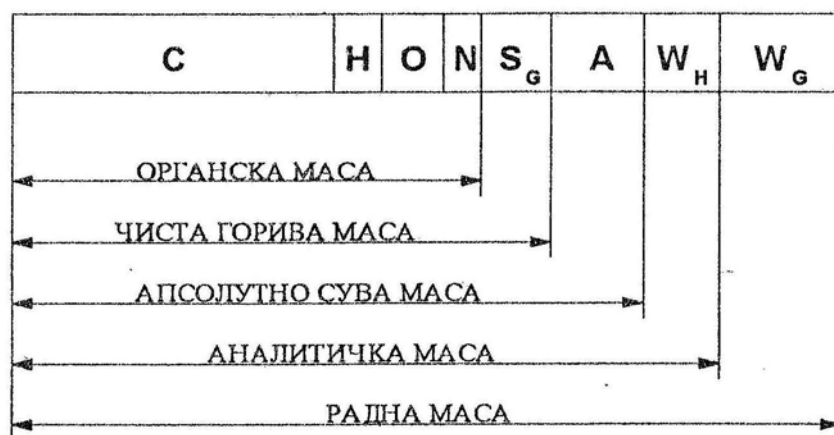




Слика 2.6

## 2.5 УСЛОВНЕ МАСЕ И ПРЕРАЧУНАВАЊЕ СА ЈЕДНЕ МАСЕ НА ДРУГУ

У зависности од садржаја влаге и минералних материја (пепела), гориво (углавном чврста горива и тежа уља за ложење) се условно дефинише различитим масама: радном, аналитичком, апсолутно сувом, чистом горивом и органском (Слика 2.7).



Слика 2.7: Шематски приказ условних маса горива

Састав чврстог горива (угаљ), после вађења из земље представља тзв. *радну масу* горива. Састав радне масе горива изражен у месеним процентима, може се написати у облику:

$$C_r + H_r + O_r + N_r + S_{Gr} + A_r + W_r = 100, \% m/m$$

где  $W_r(\%)$  представља укупну влагу, једнаку збиру грубе и хигроскопске:

$$W_r = W_G + W_H, \% m/m$$

а индекс «r» означава да се састав односи на радну масу горива.

Испитивања састава и других особина чврстих горива не могу се вршити на узорку радне масе горива због променљивог садржаја грубе влаге који зависи од температуре, притиска и влажности ваздуха. Груба влага се зато одстрањује сушењем на ваздуху и добијени узорак служи за анализе. Маса горива без грубе влаге назива *аналитичка маса* горива, а њен састав обележава се индексом «а». Састав аналитичке масе горива одређен је изразом:

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

Сушењем горива изнад 100°C (обично 105°C) може се у потпуности одстранити влага из горива. Маса горива из које је одстрањена и груба и хигроскопска влага назива се *апсолутно сува маса* горива и састав обележава се са индексом «s». Састав апсолутно суве масе горива представљен је изразом:

$$C_s + H_s + O_s + N_s + S_{Gs} + A_s = 100, \% m/m$$

Чисту гориву масу чине угљеник, водоник и сумпор. Познато је да је азот инертан и да кисеоник само потпомаже и омогућава процес сагоревања. Како се кисеоник и азот у гориву налазе везани са осталим елементима, укључују се, условно, у масу која се назива *чиста горива маса* горива. Састав условне чисте гориве масе дат је једначином:

$$C_g + H_g + O_g + N_g + S_{Gg} = 100, \% m/m$$

где индекс «g» означава састав чисте гориве масе.

Искључујући сву влагу, минералне материје и сумпор, добија се *органска маса* горива. Овај састав је такође услован, јер се сумпор налази у гориву и у виду органских једињења. Састав органске масе дат је изразом:

$$C_o + H_o + O_o + o = 100, \% m/m$$

где се индекс «o» односно на поменути састав.

У термотехничким и термоенергетским прорачунима користи се састав који се односи на радну масу горива. Прерачунавање састава са једне масе на другу и обрнуто врши се одговарајућим изразима.

За добијање ових израза могу се написати састави горива који се односе на радну и аналитичку масу у облику:

$$C_a + H_a + O_a + N_a + S_{Ga} + A_a + W_{Ha} = 100 \quad (I)$$

$$C_r + H_r + O_r + N_r + S_{Gr} + A_r + W_{Hr} = 100 - W_G \quad (II)$$

Однос збира чланова леве стране једначине I и II, а истовремено и однос било којих одговарајућих чланова леве стране, једнак је односу десних страна једначина I и II. Ако се са  $X_r$  значи се било која компонента леве стране једначине I, и са  $X_a$  било која компонента једначине II и нађе се њихов однос, добија се израз за прерачунавање састава горива са аналитичке на радну масу:

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

односно

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

На сличан начин добијају се изрази за прерачунавање састава са аналитичке на апсолутно суву масу:

$$C_a + H_a + O_a + N_a + S_{Ga} + A_a = 100 - W_{Ha}$$

$$C_s + H_s + O_s + N_s + S_{Gs} + A_s = 100$$

односно

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

или коначно

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

Аналогно претходним извођењима добијају се изрази за прерачунавање чисте гориве масе са аналитичке масе и органске масе са аналитичке масе;

$$X_r = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha} - A_a}, \quad X_o = X_a \frac{100}{100 - W_{Ha} - A_a - S_{Ga}},$$

као и међусобни односи између апсолутно суве масе и чисте гориве масе, апсолутно суве масе и органске масе, и органске масе и чисте гориве масе.

## 2.6 ОПШТА СВОЈСТВА

Особине горива заједно са елементарним саставом, дефинишу квалитет горива и сврсисходност и ваљаност његове употребе. Неке од ових особина су заједничке за све врсте горива – називају се општим својствима или општим особинама, неке од њих су специфичне за одређену врсту и намену горива.

Од низа специфичних особина разматраће се детаљније код горива само оне, које су од интереса за његову примену. Специфичне особине, као и све остале могу се разврстати на физичке, хемијске и радне или експлоатационе. Радне особине су свакако најважније, али треба водити рачуна да све заједно, укључујући и елементарни састав, омогућују употпуњавање слике о једном гориву. У даљем, ове специфичне особине разматраће се у делу материје која се односи на одговарајућу врсту горива.

Опште особине чине особине заступљене код свих врста горива. То су густина, специфична топлота, коефицијент топлотне проводљивости, количина топлоте која настаје сагоревањем горива – топлотна моћ и друге. Као далеко најважнијој општој особини свих горива – топлотној моћи, биће посвећена посебна пажња.

### 2.6.1 ТОПЛОТНА МОЋ

#### 2.6.1.1 Значај и дефиниција

Количина топлоте која се ослобађа сагоревањем неког горива и која представља ону неопходну полазну величину за низ прорачуна, представља једну од најзначајнијих карактеристика горива. Ова величина, дефинисана односом настале количине топлоте при потпуном сагоревању и јединице количине горива, од које је топлота добијена, назива се топлотна моћ.

С обзиром на услове у којима се процес сагоревања одвија, разликује се:

- топлотна моћ при константном притиску, и
- топлотна моћ при константној запремини,

а с обзиром на топлотни ниво продуката сагоревања насталих приликом одређивања топлотне моћи:

- горња, и
- доња топлотна моћ.

Како је разлика између топлотних моћи одређених при константној запремини и при константном притиску врло мала – мања од грешке која се чини приликом експерименталног одређивања, у техничким прорачунима она се занемарује и не наглашава се под којим је условима одређена.

Стриктне дефиниција горње и доње топлотне моћи гласе:

*Горња топлотна моћ* је 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 ( $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ ) у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло;
- продукти сагоревања доведени су на температуру коју је гориво имало на почетку ( $20^\circ\text{C}$ ); и
- вода, која у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и од сагорелог водоника, преведена је у течно стање, што је условљено и претходним условима – хлађењем продуката сагоревања до  $20^\circ\text{C}$ .

*Доња топлотна моћ* представља количину топлоте која се ослободи потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

- угљеник и сумпор из горива налазе се у облику својих диоксида ( $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ ) док до оксидације азота није дошло;
- продукти сагоревања доведени су на температуру коју је гориво имало на улазу у процес сагоревања ( $20^\circ\text{C}$ ); и
- вода у продуктима сагоревања остаје у парном стању.

Топлотна моћ се обележава словом „Н“: горња са  $H_g$ , а доња са  $H_d$ , при чему се индекси „g“ и „d“, односе на горњу и доњу топлотну моћ. Димензија топлотне моћи проистиче из њене дефиниције – односа количине топлоте и количине материје из које је сагоревањем топлота настала. Топлотна моћ се изражава у  $\text{kJ/kg}$  или  $\text{MJ/kg}$  за чврста и течна горива и у  $\text{kJ/m}^3$  за гасовита горива. Код течних горива користи се  $\text{kJ/dm}^3$  или  $\text{MJ/dm}^3$ . Прерачунавање „запреминске“ на „масену“ топлотну моћ врши се помоћу израза:

$$H = \frac{H(\text{kJ/m}^3)}{\rho(\text{kg/m}^3)}, \quad \text{kJ/kg}$$

где је  $\rho$  густина течног или гасовитог горива.

За случај сагоревања гориве смеше, која се састоји из више чврстих или течних горива, топлотна моћ смеште израчунава се из суме производа масеног учешћа одговарајуће компоненте из смеше ( $g_i$ ), и одговарајуће топлотне моћи ( $H_i$ ) изразом:

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} g_i H_i$$

Из разлике између горње и доње топлотне моћи, разлике у количини топлоте која се добија ако се вода, настала сагоревањем водоника и испаравањем влаге, преведе из парног у течно стање, односно, која се губи, ако вода, која се налази у продуктима сагоревања остане у парном стању, добија се општа веза између горње и доње топлотне моћи:

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

где су:

$H$  – масени проценат водоника у гориву,

$W$  – масени проценат влаге у гориву,

$9H$  – масени проценат воде, настао сагоревањем  $H$  процената водоника из горива (Из стехиометријске једначине сагоревања водоника следи да сагоревањем 1 kg водоника са 8 kg

кисеоника настаје 9 kg воде. Сагоревањем  $H$  процената водоника добија се  $9H$  процената воде. – детаљније објашњено у Поглављу 3.1.2).

- 25 – стоти део топлоте испаравања воде (За испаравање једног килограма воде температуре  $20^{\circ}\text{C}$  и њено превођење у парно стање на атмосферском притиску потребно је око  $2450 \text{ kJ/kg}$ , а стоти део – 25).

Материје које у себи не садрже водоник и влагу (чист угљеник, на пример) немају горњу и доњу топлотну моћ – обе вредности су међусобно једнаке:  $H_g = H_d$

### 2.6.1.2 Одређивање топлотне моћи

Топлотна моћ се може одредити експериментално – сагоревањем припремљеног узорка, и рачунски – на основу података елементарне или техничке анализе горива.

#### 2.6.1.2.1 Експериментално одређивање топлотне моћи

Одређивање топлотне моћи експерименталним путем омогућава добијање најтачнијих резултата. За одређивање топлотних моћи користе се специјални уређаји – калориметри. Одређивање топлотних моћи чврстих и течних горива врши се у такозваним калориметрима са бомбом, а гасовитих – у проточним калориметрима. Суштинска разлика између ова два калориметра је, што се у калориметру са бомбом процес сагоревања одвија при константној запремини, па се добија топлотна моћ при константној запремини, а код проточног калориметра – при константном притиску.

Одређивање топлотне моћи гасовитих, а ређе и течних горива проточним калориметром, заснива се на истом принципу, с том разликом, што се процес сагоревања одвија са ваздухом и на атмосферском притиску.

#### 2.6.1.2.2 Рачунско одређивање топлотне моћи

Одређивање топлотне моћи рачунским путем врши се из низа познатих података: елементарног састава, техничке анализе, статистичке обраде резултата великог броја мерења, састава горивих компонената у гориву, густине и др.

### Одређивање топлотне моћи на бази познатог елементарног састава

Одређивање топлотне моћи на основу података елементарне анализе заснива се на познавању елементарног састава горива и топлотних моћи сваког горивог елемента. Приликом израде образаца за израчунавање топлотне моћи учињено је неколико претпоставки:

- да је горива материја састављена од елемента – C, H, S, O, N, док је она, најчешће скуп различитих елемената и једињења, и да је њена топлотна моћ једнака збиру количина топлота које се добијају сагоревањем појединих елемената из састава горива;
- да је сав везани водоник у фосилним чврстим горивима спојен са кисеоником (што није тачно, јер је део кисеоника везан и са угљеником, односно, азотом, а део је и у слободном стању);
- угљеник и сумпор су једини гориви елементи који у састав угља улазе делимично и у слободном стању. Угљеник може бити у различитим видовима (аморфни, графит) чије су топлотне моћи различите, а образац узима једну вредност ове карактеристике. Сумпор, пак, може бити у саставу пирита и сагоревати у  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  при чему се добијају различите топлоте;
- угљеник и водоник налазе се, делом, и везани у угљеводоничним једињењима у угљевима, а топлотне моћи су тих једињења различите од количине топлоте које се добијају појединачним сагоревањем ових елемената у слободном стању.

У Европи се углавном користе обрасци Савеза немачких инжењера (Verein Deutsche Ingenieure – VDI образац из 1899.године), који гласе:

- за горњу топлотну моћ

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

- за доњу топлотну моћ

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

У свим обрасцима слова представљају састав појединих елемената изражених у месеним процентима. У обрасцу Савеза немачких инжењера цифре представљају заокружене вредности стотих делова топлотне моћи горивих елемената (C, H и S).

Поред наведених образаца за израчунавање горње и доње топлотне моћи, за биомасу је изведен читав низ различитих образаца који узимају у обзир за израчунавање различите гориве елементе, односно елементе и једињења која улазе у састав биомасе.

#### Одређивање топлотне моћи на основу познатог састава по горивим компонентама

Овакви обрасци користе се углавном код гасовитих горива, код којих се не одређује елементарни састав већ састав горивих компонената. У општем случају топлотна моћ гасовитих горива одређује се као збир производа запреминског учешћа појединих компонената  $r_i$  и одговарајућих топлотних моћи угљоводоничних једињења у њему ( $H_i$ ):

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} r_i H_i \quad \text{kJ/m}^3$$

или примењено

- за доњу топлотну моћ

$$H_d = 107,8H_2 + 126,2CO + 358,7CH_4 + 594,8C_2H_4 + 565,1C_2H_2 + 644,2C_2H_6 + 928,92C_3H_8 + 1236,5C_4H_{10} + 877,0C_3H_6 + 1155,8C_4H_8 + 234,6H_2S \quad \text{kJ/m}^3$$

- за горњу топлотну моћ

$$H_g = 127,5H_2 + 126,2CO + 398,1CH_4 + 634,2C_2H_4 + 584,8C_2H_2 + \dots \quad \text{kJ/m}^3$$

Садржај горивих компонената дат је у запреминским процентима, а цифре представљају стоте делове одговарајућих топлотних моћи.

#### Прерачунавање топлотних моћи са једне условне масе на другу

Прерачунавање топлотних моћи горива са једне условне масе на другу врши се на основу познатих вредности топлотних моћи (добитених експериментално или рачунски) и елементарног састава горива. Користећи већ познате изразе за прерачунавање састава горива са једне условне масе на другу, добијају се одговарајући изрази за топлотне моћи. Они ће бити изражени у зависности од топлотних моћи аналитичке масе горива, јер се на овој маси врши анализа горива и експериментално одређивање топлотне моћи:

- за радну масу горива

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

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

- за апсолутно суву масу горива

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

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

- за чисту гориву масу

$$H_{gg} = H_{ga} \frac{100}{100 - (W_{Ha} + A_a)},$$

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

- за органску масу горива

$$H_{do} = (H_{da} + 25W_{Ha}) \frac{100}{100 - (W_{Ha} + A_a + S_{Ga})}$$

$$H_{go} = H_{ga} \frac{100}{100 - (W_{Ha} + A_a + S_{Ga})}$$