

Извод из теоријских основа (учбеник Енергија, Д. Митић)

Појам горива

Под *горивим материјама* се подразумевају такве супстанце које подвргнуте процесу сагоревања дају као материјалне продукте процеса - продукте сагоревања (у општем случају чврстих и течних) одређену количину топлоте и светлости.

Горивом се називају само оне гориве материје које подвргнуте процесу сагоревања поред продукта сагоревања дају такву количину топлоте која се може економично користити (за загревање или претварање у механичку и електричну енергију).

Да би се нека горива материја користила као гориво она мора да задовољи и низ допунских захтева које намеће данашњица:

- њиховим сагоревањем у кратком времену мора се произвести знатна количина енергије;
- мора их бити на налазиштима у довољној количини;
- експлоатација мора бити лака и економична;
- морају садржати мале количине баласта;
- не смеју мењати састав у току транспорта и ускладиштења;
- са становишта безбедности од пожара и експлозија морају бити поуздани;
- морају имати економску цену и продукти не смеју бити токсични и опасни по средину.

Подела горива према агрегатном стању

Једна од основних подела горива је *према агрегатном стању* (на чврста, течна и гасовита).

Табела Општа подела горива

Агрегатно стање	Према начину добијања	
	Природна горива	Прерађена горива
чврсто	дрво, тресет, угљеви - (лигнит, мрки, камени, антрацит), гориви шкриљци, уљани песак	дрвени угаљ, брикет, полукокс, кокс
течно	нафта	бензин, петролеум, дизел моторно гориво, мазут, алкохол, тер
гасовито	природни земни гас	рафинеријски, дестилациони, генераторски, синтетни и др. гас

Састав горива

Састав горива или гориве материје је потребно знати у циљу: упознавања и оцене могућности примене или сагоревања, одређивања количине топлоте и продукта сагоревања, провере степена корисности и новопроектаних и реконструисаних постројења и упоређивања симулираног и стварног процеса сагоревања код моделирања процеса.

У том циљу се раде тзв. елементарна и техничка анализа горива. Елементарном анализом се одређује састав горива, а техничком особине важне за његову примену.

Елементарна анализа горива

Елементарна анализа горива не пружа потпун увид у особине горива али омогућава израчунавање:

- потребне количине ваздуха за потпуно сагоревање,
- топлотне моћи горива,
- количине и састава продукта сагоревања и
- температуре сагоревања.

У општем случају узорак масе горива m ($kg\ gor$) састоји се из: масе горивих елемената (угљеника, водоника и горивог дела сумпора) и масе негоривих елемената (кисеоника и азота) и условно названих елемената (пепела и воде). Тако се састав горива може приказати као збир података:

$$c + h + o + n + s + a + w = 1$$

где величине:

$$c (=) \frac{kg_C}{kg_{gor}} \quad h (=) \frac{kg_H}{kg_{gor}} \quad o (=) \frac{kg_O}{kg_{gor}} \quad n (=) \frac{kg_N}{kg_{gor}}$$

$$s (=) \frac{kg_S}{kg_{gor}} \quad a (=) \frac{kg_A}{kg_{gor}} \quad w (=) \frac{kg_W}{kg_{gor}}$$

Односно

$$u_i^m (=) \frac{kg_i}{kg_{gor}}$$

представљају масене уделе елементарних састојака горива. Сума свих удела је:

$$\sum_{i=1}^7 u_i^m = 1$$

Састав горива се често приказује и процентуално у облику

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

$$\sum U_i^m = 100\%$$

Уобичајени начин изражавања за чврста и течна горива је масеним уделима (или процентима) док се гасовита горива најчешће дефинишу запреминским уделима одређених гасних компоненти.

Техничка анализа горива

Загревањем чврстих горива, на повишеним температурама без присуства ваздуха, долази до термичког разлагања на испарљиве и неиспарљиве састојке. Из ове чињенице и поделе на гориве и негориве састојке следи састав на основу тзв. техничке анализе на:

Испарљиве састојке

гориви испарљиви састојци (волатили)	Vol (%);	vol (kg_{vol}/kg_g)
негориви испарљиви састојци (вода):	W (%)	w (kg_{H_2O}/kg_g)

Неиспарљиве састојке

гориви угљеник (фиксни угљеник)	C_{fix} (%)	c_{fix} ($kg_{C_{fix}}/kg_g$)
негориве материје (пепео)	A (%)	a (kg_A/kg_g)

Тако да је:

$$Vol + W + C_{fix} + A = 100\%$$

$$vol + w + c_{fix} + a = 1$$

На основу ова четири основна податка може се направити и скуп следећих изведених података:

Коксни остатак	$k.o. = c_{fix} + a$	Чврсто	$\check{C}vrsto = k.o. = c_{fix} + a$
Испариво	$isp. = vol + w$	Сагориво	$Sagorivo = c_{fix} + vol$
	$balast = a + w$	негориво	$Negorivo = balast = a + w$

[Type here]

Поред ових података у техничке анализе се обично дају још и:

горња топлотна моћ горива $(H_g) (J/kg)$

доња топлотна моћ горива $(H_d) (J/kg)$

где се под топлотном моћи подразумева количина топлоте ослобођена потпуним сагоревањем јединице количине горива

Податке техничке анализе чине садржаји волатила, влаге, коксног остатка (пепео заједно са фиксно везаним угљеником), садржај горивог и негоривог сумпора, топлотна моћ горива, понашање пепела на повишеним температурама (топљивост пепела), дужина и боја пламена, изглед и структура коксног остатка и др. У саставу техничке анализе се даје и садржај сумпора у свим његовим облицима.

За техничку анализу горива се увек узима гориво сталног састава - тзв. гориво суво на ваздуху (аналитички узорак).

Основне карактеристике елемената горива

Гориво се састоји из сагоривог и несагоривог дела (баласта). У састав материја које учествују у процесу сагоревања улазе: угљеник, водоник, гориви сумпор, кисеоник и азот. Гориви елементи су само угљеник, водоник и сумпор, а баласт чине вода и пепео.

Угљеник (C) је у гориву присутан у највећој количини и развија највећу количину топлоте по јединици масе од свих компоненти. Укупан садржај угљеника у гориву се одређује елементарном анализом c [kg_C/kg_g], а техничком анализом се одређује само фиксни део c_{fix} [$kg_{c_{fix}}/kg_g$]. На тај начин се посредно добија и volatilni (isparljivi) deo ugljenika ($c_{vol} = c - c_{fix}$). Топлота добијена сагоревањем 1 kg угљеника износи 33829 [kJ/kgC], а максимална температура сагоревања је 2513 K [2240 °C], рачунато без топлотних губитака.

Водоник (H) се налази у горивима у сва три агрегатна стања као везан а у гасовитим и као слободан. Топлота добијена сагоревањем 1 kg водоника је 4,2 пута већа него угљеника (али обзиром да га је у гориву мање значај му је мањи него угљеников) и износи 142014 [kJ/kgH]. Максимална температура при његовом сагоревању је 2508 K [2235 °C].

Кисеоник (O) није горива супстанца, али својим присуством у гориву смањује потребну количину за сагоревање. Присутан је као везан са другим једињењима (сем у гасовитим где је и слободан). Његов садржај је већи у млађим горивима (дрво, тресет, лигнит, биомасе).

Азот (N) се код природних горива садржи у незнатној количини и обично се даје у елементарној анализи заједно са кисеоником (као збир $o+n$). У задње време се више посвећује пажња садржају азота у гориву (нарочито чврстом) па су пронађене и корелације које дефинишу однос азота у волатилима и неиспарљивом делу горива. Нека једињења азота у продуктима сагоревања су канцерогена.

Сумпор (S) се у горивима јавља као гориви (у виду органских једињења и пиритни FeS_2 и негориви у облику сулфата гвожђа и калцијума). Топлота добијена његовим сагоревањем износи 9295 [kJ/kgS], при сагоревању у стабилни SO_2 , или 13816 [kJ/kgS], при сагоревању у SO_3 . Структура сумпора се може представити на следећи начин:

$$S_u = S_{gor} + S_{neorg} = S_{org} + (S_{pir} + S_{sulf})$$

$$S_g = S_{org} + S_{pir}$$

$$S_{neog} = S_{sulf}$$

где су:

S_u	сумпор укупни	S_{neog}	сумпор неоргански
S_{sulf}	сумпор сулфатни	S_{pir}	сумпор негориви
S_{org}	сумпор органски	S_{ng}	сумпор пиритни
S_g	сумпор гориви		

Минералне материје (А) садрже све врсте горива сем гасовитих и најлакших фракција прераде нафте. Минералне примесе су у чврстим горивима присутне као:

- *примарне* минералне примесе (образоване још у праматерији из које је гориво настало),
- *секундарне* (које су у гориво доспеле током његовог настајања) и
- *терцијерне* (грубе механичке нечистоће доспеле у гориво у току његовог вађења).

У процесу сагоревања минералне примесе трпе читав низ промена (разлажу се и делимично оксидишу) тако да:

- алумосиликати и гипс, губе кристалну воду,
- пирит сагорева и
- карбонати се потпуно разлажу издвајајући угљен -диоксид.

Према томе, **пепео** представља смешу оксида минералних материја која остаје након завршеног процеса сагоревања и после свих хемијских трансформација на температури на којој се одвија процес.

Присуство пепела у већој количини доводи до: погоршавања преноса топлоте на грејне површине котла (а тиме и до лошег загревања и испаравања воде или ваздуха), хабања радних елемената млинова, повећање транспортних трошкова и отпора у димном тракту. Посебно је важна карактеристика понашање пепела на повишеним температурама. Могуће је његово топлење, лепљење по грејним површинама и озиду. Све то доводи до значајног смањивања коефицијента пролаза топлоте. О овим карактеристикама мора се водити рачуна при пројектовању котлова и размештању грејних површина, а такође и код организације процеса сагоревања горива у условима експлоатације.

Влага (W) присутна у гориву умањује топлоту добијену његовим сагоревањем, снижава температуру процеса сагоревања а за њено загревање и испаравање се троши $44 \text{ [kJ/mol]}_{\text{ воде}} \sim 2450 \text{ [kJ/kg H}_2\text{O]}$. У чврстом гориву је присутна као:

- **груба влага** (спољна влага) унешена у гориво квашењем код вађења, лежања и транспорта. Одстрањује се сушењем на $50 \text{ [}^\circ\text{C]}$ у трајању од $3h$ или на собној температури $20 \text{ [}^\circ\text{C]}$ до стабилизације масе;
- **хигроскопска влага** (или тзв. унутрашња влага) увучена у поре горива капиларним силама. Одстрањује се сушењем на $100\text{-}105 \text{ [}^\circ\text{C]}$ у трајању од $2h$;
- **конституциона влага** (хемијски везана тзв. кристална вода). Обично се занемарује у техничким прорачунима.

Укупна влага се може представити збиром грубе и хигроскопске:

$$w_u = w_g + w_h.$$

$$W_u = W_g + W_h.$$

где је:

$w_u \text{ (kg/kg g)}$	$W_u \text{ [%]}$	укупна влага
$w_h \text{ (kg/kg g)}$	$W_h \text{ [%]}$	хигроскопска влага
$w_g \text{ (kg/kg g)}$	$W_g \text{ [%]}$	груба влага

Баласт се састоји из незапалјивих минералних материја (које се при горењу претварају у пепео) и воде (влага) горива.

Топлотна моћ горива

Под топлотном моћи H подразумева се количина топлоте добијена потпуним сагоревањем јединице количине горива под условом да:

- угљеник и сумпор из горива буду у продуктима у облику својих диоксида и гасној фази, а азот да не подлеже сагоревању;
- продукти сагоревања буду сведени на температуру коју је гориво имало пре сагоревања (293 K);

[Type here]

- вода у продуктима сагоревања буде у течној фази (горња топлотна моћ H_g горива), или да вода у продуктима буде у облику паре (у ком случају се ради о доњој топлотној моћи горива H_d).

Из дефиниција горње и доње топлотне моћи горива следи да разлика у њиховој вредности проистиче из тога у каквој се фази налази вода у продуктима сагоревања. По пореклу вода у продуктима потиче из садржаја влаге у гориву (w [kg_{H_2O}/kg_g]; W [%]) или се формира као продукт сагоревања водоника (h [kg_{H_2}/kg_g]; H [%]). Очигледно да уколико се вода у продуктима налази у парном стању (да је један део топлоте добијен сагоревањем јединице количине горива утрошен на њено загревање од 293 K до 373 K и превођење у парну фазу) и да се ради о доњој топлотној моћи горива. Топлота потребна за загревање и испаравање присутне и настале воде у продуктима сагоревања је $44\text{ kJ/mol} = 2444\text{ kJ/kg} \approx 2500\text{ kJ/kg}$.

Доња топлотна моћ H_d , израчуната VDI формулом за чврсто гориво датог састава је:

$$H_d = 340 \cdot C + 1200 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 105 \cdot S - 25 \cdot W$$

Обзиром да је укупан садржај воде у продуктима сагоревања једнак збиру од присутне влаге w [kg_{H_2O}/kg_g] и настале сагоревањем $9h$ [kg_{H_2O}/kg_g], онда је:

$$H_g = H_d + 2500(9h + w) \left[\frac{kJ}{kg_g} \right] \qquad H_g = H_d + 25(9H + W) \left[\frac{kJ}{kg_g} \right]$$

w [kg_{H_2O}/kg_g] масени удео влаге у гориву,

W [%] процентуално масено учешће влаге у гориву,

h [kg_{H_2}/kg_g] масени удео водоника у гориву,

H [%] процентуално масено учешће водоника у гориву

H_g, H_d [kJ/kg_g] горња и доња топлотна моћ горива.

Очигледно је, да уколико гориво не садржи влагу и водоник:

$$w = h = 0, \text{ тј. } H_g = H_d$$

горња и доња топлотна моћ горива имају једнаке вредности.

Један од најважнијих података техничке анализе је садржај волатила у гориву. Волатили се формирају унутар честице угља, а њихова дифузија у околну атмосферу је повезана са проласком волатила кроз угљену масу. Услед високих притисака насталих у току термичке деструкције угљене честице и насилног отварања пора и пукотина за миграцију волатила, овај процес је често праћен уситњавањем честица угља. Тако волатили и деволатилизација имају веома важну улогу у сагоревању угља, посебно код паљења и стабилизације пламена. Познавање процеса деволатилизације је основа за одређивање почетних услова за наредну фазу - сагоревање коксног остатка.

Појам сагоревања

Сагоревање горива представља први вид конверзије неког вид горивог материјала са циљем добијања топлотне енергије.

Под сагоревањем се подразумева сложен физичкохемијски процес праћен интензивним ослобађањем топлотне и светлосне енергије као и одређене количине материјалних продуката сагоревања.

Од техничког решења постројења за сагоревање, брзине деволатилизације, брзине сагоревања и организације сагоревања зависи економичност и поузданост рада ложишта и котла у целини као и целокупног термоенергетског постројења.

Прорачун основних параметра за сагоревање

С обзиром на несавршеност припреме гориве смеше, немогућност да се у ложишту обезбеди савршен контакт између горива и ваздуха као и одвијање самог процеса сагоревања, теоријска, тј. минимална количина ваздуха узрокује да се процес сагоревања неће одвијати као потпун. Због тога се систему увек доводи већа количина ваздуха од теоријске. Та количина ваздуха се назива стварном.

Однос између стварно доведене количине ваздуха и минимално потребне количине се назива коефицијентом вишка ваздуха.

$$\lambda = \frac{L_{stv}}{L_{min}} \left(= \left[\frac{kg_v}{kg_g} \cdot \frac{kg_g}{kg_v} \cdot \frac{m^3_v}{m^3_v} \cdot \frac{kg_g}{kg_g} \cdot \frac{kmol_v}{kg_g} \cdot \frac{kg_g}{kmol_v} \right] \right) [-]$$

Ако је ваздух влажан, стварно потребна количина ваздуха се увећава за фактор f :

$$L_{stv,w} = f \cdot L_{stv}$$

где је:

$$f = 1 + \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s} \quad \text{Корекциони фактор за влажан ваздух}$$

φ (%) - релативна влажност ваздуха,

p_s (Pa) - парцијални притисак водене паре у засићеном стању,

p (Pa) - притисак ваздуха.

У организованим и контролираним процесима сагоревања коефицијент вишка ваздуха се подешава на оптималну вредност, а она пак зависи од врсте горива, технологије сагоревања и типа ложишта.

Табела, Преглед неких примењених вредности коефицијента вишка ваздуха

λ	Гориво и начин сагоревања
1,05 - 1,15	природна гасовита горива и мазут у котловским ложиштима
1,3 - 1,5	чврсто гориво које сагорева у котловским и технолошким ложиштима и пећима
1,2 - 1,25	"спрашени" угаљ који сагорева у лету у ложиштима енергетских котлова
1,2 - 1,3	угаљ (0-30 мм) који сагорева у флуидизованом слоју

Приликом извођења технолошких прорачуна различитих процеса сагоревања често је у употреби поред коефицијента вишка ваздуха и појам вишка ваздуха. Вишак ваздуха је разлика између стварно уведене количине ваздуха у процес сагоревања и минимално потребне количине ваздуха за сагоревање ($L_{stv} - L_{min}$). Ако се он изрази у односу на минимално потребну количину ваздуха добија се процентуална вредност вишка ваздуха:

$$\alpha = \frac{L_{stv} - L_{min}}{L_{min}} \cdot 100[\%] \quad \text{или} \quad \alpha = (\lambda - 1) \cdot 100[\%]$$

која се уобичајено назива само **вишком ваздуха**.

Одавде се стварна количина ваздуха може изразити преко вишка ваздуха као:

$$L_{stv} = \left(\frac{\alpha}{100} + 1 \right) L_{min}$$

У литератури се среће и други начин специфицирања почетног састава реактаната: то је однос гориво/ваздух (*fuel/air ratio*). Ако се врши упоређење ове величине са адекватном величином при стехиометријским условима, онда се тај однос назива "еквивалентни однос" (*equivalence ratio*, ϕ):

[Type here]

$$\phi = \frac{\left. \frac{\text{gorivo}}{\text{vazduh}} \right|_{\text{stvarno}}}{\left. \frac{\text{gorivo}}{\text{vazduh}} \right|_{\text{stehiometrijsko}}} = \frac{\frac{m_g}{m_v}}{\left(\frac{m_g}{m_v} \right)_s} = \frac{\frac{1}{L_{stv}}}{\frac{1}{L_{\min}}} = \frac{L_{\min}}{L_{stv}} = \frac{1}{\frac{L_{stv}}{L_{\min}}} = \frac{1}{\lambda}$$

С обзиром да реципрочне вредности односа гориво/ваздух и гориво/ваздух при стехиометријским условима претстављају стварну и теоријску количину ваздуха онда је и:

$$\phi = \frac{1}{\lambda}$$

Оптимална вредност коефицијента вишка ваздуха за сваку врсту горива подешава се у процесу сагоревања на основу резултата анализе димних гасова на излазу из котла. Нарочито је важно одржавати оптимални вишак ваздуха код сагоревања чврстог горива, мазута и природног гаса, поготову што од тога зависи степен искоришћења постројења, а и сигурност рада постројења у односу на услове одржавања режима без зашљакивања размењивачких и експлозивне безбедности гориве смеше.

Теоријска количина ваздуха за познати елементарни састав горива се може одредити на основу следећих израза као:

Моларна $L_{\min}^M = \frac{1}{0,21} \left[\frac{1}{12} c + \frac{1}{4} h + \frac{1}{32} s - \frac{1}{32} o \right] \left[\frac{\text{kmol}_v}{\text{kg}_g} \right]$

Запреминска $L_{\min}^Z = \frac{1}{0,21} \left[1,867c + 5,6h + 0,7s - 0,7o \right] \left[\frac{\text{m}^3_v}{\text{kg}_g} \right]$

Масена $L_{\min}^m = \frac{1}{0,23} \left[\frac{8}{3} c + \frac{8}{1} h + \frac{1}{1} s - \frac{1}{1} o \right] \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_g} \right]$

Стварна количина ваздуха следи из задате вредности коефицијента вишка ваздуха:

$$\lambda = \frac{L_{stv}}{L_{\min}} (=) \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_g} \frac{\text{kg}_g}{\text{kg}_v} \cdot \frac{\text{m}^3_v}{\text{kg}_g} \frac{\text{kg}_g}{\text{m}^3_v} \cdot \frac{\text{kmol}_v}{\text{kg}_g} \frac{\text{kg}_g}{\text{kmol}_v} \right] (=) [-]$$

и одређене теоријске количине ваздуха као:

$$L_{stv,w} = f \cdot L_{stv}$$

Укупна количина гасовитих продуката сагоревања на основу ових вредности се може одредити као

запреминска $V_{ps,p}^z = 1,867c + 11,2h + 0,7s + 0,79L_{stv}^z + 0,8n + (1-f)L_{stv}^z + \frac{22,414}{18} w + 0,21(\lambda-1)L_{\min}^z \left[\frac{\text{m}^3_{ps}}{\text{kg}_g} \right]$

масена $V_{ps,p}^m = \frac{8}{3}c + 9h + 2s + 0,77L_{stv}^m + n + \frac{22,414}{18}(1-f)L_{stv}^z + w + 0,23(\lambda-1)L_{\min}^m \left[\frac{\text{kg}_{ps}}{\text{kg}_g} \right]$