

# **EKSERGIJSKI STEPEN KORISNOSTI PRI SAGOREVANJU I GASIFIKACIJI**

## **BIOMASE**

Prof. dr Vladan Karamarković, Mašinski fakultet Kraljevo

Marašević Miljan, dipl. ing. istraživač saradnik, Mašinski fakultet Kraljevo

Karamarković Rade, dipl. ing. asistent pripravnik, Mašinski fakultet Kraljevo

### **Rezime rada**

U radu je izvršena uporedna analiza eksergijskih stepena korisnosti pri sagorevanju biomase i gasovitog goriva koje nastaje u procesu istosmerne gasifikacije. Uporedna analiza je pokazala da se viši eksergijski stepen korisnosti ostvaruje sagorevanjem gasovitog goriva, odnosno da termičku transformaciju biomase treba obaviti nakon potpune gasifikacije u reaktorima istosmernog toka, i naknadnim sagorevanjem gasa u spregnutom sistemu istosmerni reaktor – ložište za sagorevanje.

Ključne reči: biomasa, eksnergija, sagorevanje, gasifikacija.

### **1. Uvod**

Ekperimentalni rezultati dobijeni pri sagorevanju i gasifikaciji biomase i teorijska analiza procesa sagorevanja gasovitog i čvrstog goriva, upućuju na zaključak da se sagorevanjem gasovitog goriva koje nastaje u procesu istosmerne gasifikacije biomase na atmosferskom pritisku mogu postići viši tehnološki efekti nego pri direktnom sagorevanju. Za proveru takvog zaključka u radu je izvršena upredna analiza eksergijskih stepena korisnosti procesa sagorevanja vlažne biomase i odgovarajućeg gasovitog goriva. Zbog nemogućnosti određivanja očuvane eksnergije za oba procesa, eksergijski stepen korisnosti je određen na osnovu koeficijenta nepovratnosti. Ravnotežno stanje produkata sagorevanja sa okolinom svedeno je na pritisak  $p_0 = 1.013 \cdot 10^5$  Pa i temperaturu  $T_0 = 293$  K,

iako bi se povratnim mešanjem sa vazduhom teorijski još mogao dobiti rad. Analiza uticajnih veličina koje određuju eksergijski stepen korisnosti procesa sagorevanja gasovitog i čvrstog goriva izvršena je uzimajući u obzir:

- eksergijski gubitak usled nepotpunosti sagorevanja,
- eksergijski gubitak u izlaznim produktima,
- eksergijski gubitak usled nepovratnosti sagorevanja i
- razmenjenu količinu toplove.

## **2. Eksergijski gubitak usled nepotpunosti sagorevanja**

Nepotpunost sagorevanja gasovitih i čvrstih goriva manifestuje se u sadržaju nesagorelih materija čvrstog ostatka i nesagorelih gasovitih i čvrstih materija sadržanih u produktima sagorevanja. Količina nesagorelog čvrstog ostatka pri sagorevanju biomase definisana je hemijskim sastavom (količinom mineralnih materija u čvrstom gorivu), vremenom termičkog tretiranja, topotnim opterećenjem ložišnog prostora i količinom vazduha za sagorevanje. Ne uzimajući u obzir negativne efekte koji nastaju povećanjem količine vazduha, optimalna vrednost eksergijskog gubitka usled nepotpunog sagorevanja sadržanog u čvrstom ostatku se nalazi u granicama od 1.5 % do 2.5 %.

U procesu sagorevanja biomase nastaje i propadanje goriva kroz rešetku, eksergijski gubitak čija je vrednost definisana veličinom čestice i tipom rešetke. Eksperimentalna ispitivanja sa različitim ložištima za sagorevanje biomase u sloju pokazuju da se vrednost ovog gubitka nalazi u granicama od 1.5% do 3% [2]. Eksergijski gubitak usled propadanja goriva kroz rešetku nastaje i pri proizvodnji gasovitog goriva. Međutim, manja površina rešetke i manje količine produkata omogućavaju da se vrednost ovog gubitka nalazi u granicama od 0.5 % do 1.2 %.

Eksergijski gubitak usled hemijski nepotpunog sagorevanja nastaje usled prisustva gorivih gasovitih komponenata u produktima sagorevanja ( CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> ) a određen je vremenom termičkog tretiranja i koeficijentom viška vazduha. Eksperimentalno dobijeni rezultati [2] pokazuju da

se vrednost eksergijskog gubitka usled hemijski nepotpunog sagorevanja pri sagorevanju gasovitog goriva može zanemariti, dok se pri sagorevanju komadnog čvrstog goriva nalazi u granicama od 1% do 1.5%.

Na osnovu prethodne analize može se zaključiti, da je eksergijski gubitak usled nepotpunog sagorevanja izraženiji pri sagorevanju čvrstog goriva i da se vrednost gubitka nalazi u granicama:

- za gasovito gorivo      0.5 – 1.3 %,
- za čvrsto gorivo      3.5 – 6.5 %.

### **3. Eksergijski gubitak u izlaznim produktima**

Eksergijski gubitak u izlaznim produktima određuje se izrazom:

$$E_p = (H_p - H_o) - T_o \cdot (S_p - S_o) \dots \dots \dots \quad (1),$$

pri čemu je entalpija gasovitih produkata određena zapreminom produkata, specifičnim topotnim kapacitetom, temperaturom produkata, topotnom moći goriva i stepenom korisnosti ložišnog prostora. Uporedna analiza eksergijski gubitaka u izlaznim produktima za sagorevanje biomase i odgovarajućeg gasovitog goriva izvržena je određivanjem zavisnosti promene količina vlažnih produkata od koeficijenta viška vazduha. Pokazuje se da je zapremina vlažnih produkata sagorevanja gasovitog goriva iz biomase manja u poređenju sa produktima sagorevanja biomase iste vlažnosti za isti koeficijent viška vazduha. Razlike u količinama produkata koje neposredno određuju eksergijski gubitak, još su izraženije ako se proces sagorevanja obavlja u realnim uslovima.

Eksergijski gubitak u izlaznim produktima koji nastaje sagorevanjem gasovitog goriva dobijenog u procesu istosmerne gasifikacije biomase na atmosferskom pritisku manji je od gubitka u izlaznim produktima pri sagorevanju biomase. Razlika eksergijskih gubitaka nalazi se u granicama od 31.96 do 44.87 %, pri temperaturi produkata od 140 °C i promeni koeficijenta viška vazduha od 1.6 do 2.6 za biomasu odnosno 1.05 do 1.25 za sagorevanje gasovitog goriva iz biomase.

#### **4. Eksergijski gubitak usled nepovratnosti sagorevanja**

Eksergijski gubitak usled nepovratnosti sagorevanja po veličini je najuticajniji parametar eksergijskog stepena korisnosti postrojenja za sagorevanje čvrstih i gasovitih goriva. Za analizu eksergijskog gubitka usled nepovratnosti sagorevanja gorive smeše različitih temperatura posmatraće se dijagramska zavisnost entalpije gorive smeše i produkata sagorevanja pri stalnom pritisku, u funkciji entropije (sl. 1.).

Sagorevanjem gorive smeše (tačka 1), koja se nalazi na temperaturi okoline (sl. 1.), pri teorijskom sagorevanju (bez gubitaka), nastaju gasoviti produkti (tačka 2) pri čemu vrednost entropije poraste za  $\Delta S = S_2 - S_1$ . Ako je tokom procesa pritisak ostao konstantan javiće se eksergijski gubitak usled nepovratnosti sagorevanja  $\Delta E = T_o \Delta S$ .

Sagorevanjem predgrejane gorive smeše (tačka  $1_v$ ), temperature  $T_{1v}$  koja se nalazi na pritisku okoline nastaju gasoviti produkti (tačka  $2_v$ ), pri čemu se entropija promenila za vrednost  $\Delta S_v = S_{2v} - S_{1v}$ . Eksergijski gubitak usled nepovratnosti sagorevanja predgrejane gorive smeše  $\Delta E_v = T_o \Delta S_v$  znatno je manji u poređenju sa sagorevanjem gorive smeše koja se nalazi na temperaturi okoline.

Za određivanje entalpije i entropije gorive smeše i gasovitih produkata sagorevanja biomase i odgovarajućeg gasovitog goriva nastalog u procesu istosmerne gasifikacije na atmosferskom pritisku korišćeni su sledeći izrazi:

Entalpija gorive smeše (biomasa + vazduh)

$$H_{gs} = H_d + t_g c_{pg} \Big|_0^t m_g + L_s c_{pv} \Big|_0^t t_v .$$

Entropija gorive smeše (biomasa + vazduh)

$$S_{gs} = m_g c_{pg} \Big|_0^t \ln\left(\frac{273.15 + t_g}{273.15}\right) + L_s c_{pv} \Big|_0^t \ln\left(\frac{273.15 + t_v}{273.15}\right).$$

Pri određivanju zavisnosti promene entropije od temperature prepostavlja se da biomasa dolazi u prostor za sagorevanje sa konstantnom temperaturom koja je jednaka temperaturi okoline, a predgreva se vazduh za sagorevanje.

Entalpija produkata sagorevanja

$$H_p = V_{rw} \left( \sum_i c_{pi} \Big|_0^t r_i \right) t_p .$$

Entropija produkata sagorevanja

$$S_p = V_{rw} \left( \sum_i c_{pi} \Big|_0^t r_i \right) \ln \left( \frac{273.15 + t_p}{273.15} \right) .$$

Entalpija gasovite gorive smeše

$$H_{gg} = V_{gg} \left( \sum_i r_i c_{pi} \Big|_0^{t_g} \right) t_g + V_{gg} H d_{gg} .$$

Entropija gasovite gorive smeše

$$S_{sg} = V_{Lgas} c_{pv} \left|_0^t \ln \left( \frac{273.15 + t_v}{273.15} \right) \right. + m_B c_{pb} \ln \left( \frac{273.15 + t_B}{273.15} \right) .$$

Eksergijski gubitak usled nepovratnosti sagorevanja biomase i odgovarajućeg gasovitog goriva i eksergijski stepen korisnosti procesa za različite vrednosti koeficijenta viška vazduha za biomasu elementarnog sastava C = 38.71%, H = 4.74%, O = 33.18%, N = 1.58%, S = 0, A = 0.79%, i W = 21.00% predstavljen je u tabelama (1) i (2).

Tabela 1. Eksergijski stepen korisnosti sagorevanja biomase

Koeficijent viška vazduha [ $\lambda$ ]	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6
Zapremina vlažnih produkata sagorevanja [m <sup>3</sup> /kgB]	6.527	7.248	7.969	8.690	9.411	10.132
Teorijska temperatura sagorevanja [°C]	1315.0	1207.5	1116.6	1038.8	971.3	912.2
Gubitak eksergije u izlaznim produktima [kJ/kgB]	175.02	193.32	211.62	229.93	248.23	266.54
Gubitak eksergije usled nepovratnosti sag. [kJ/kgB]	5110.18	5340.97	5556.74	5759.11	5949.71	6129.38
Gubitak eksergije usled spoljašnjeg rashl. [kJ/kgB]	5	5	5	5	5	5

Gubitak eksergije usled nepotpunosti sag. [kJ/kgB]	533.64	533.64	533.64	533.64	533.64	533.64
<b>Eksergetski stepen korisnosti [%]</b>	<b>56.35</b>	<b>54.48</b>	<b>52.72</b>	<b>51.07</b>	<b>49.50</b>	<b>48.02</b>

Tabela 2. Eksergijski stepen korisnosti gasifikacije i sagorevanja gasovitog goriva iz biomase

Koeficijent viška vazduha [ $\lambda$ ]	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25
Gubitak eksergije usled nepovratnosti pri gasif. [kJ/kgB]	1192.6	1192.6	1192.6	1192.6	1192.6
Gubitak eksergije usled nepovratnosti pri sag. [kJ/kgB]	3517.8	3559.7	3600.8	3641.5	3681.6
Temperatura na kraju procesa gasifikacije [ $^{\circ}\text{C}$ ]	321	321	321	321	321
Temperatura sagorevanja gasovitog goriva [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1568.3	1541.4	1515.4	1490.3	1466
Gubitak eksergije u izlaznim produktima [kJ]	78.54	80.20	81.86	83.52	85.18
Eksergetski stepen korisnosti gasifikacije [%]	87.76	87.76	87.76	87.76	87.76
Eksergetski stepen korisnosti sag. gasovitog goriva[%]	73.01	72.68	72.36	72.04	71.73
<b>Eksergetski stepen korisnosti [%]</b>	<b>60.77</b>	<b>60.44</b>	<b>60.12</b>	<b>59.80</b>	<b>59.49</b>

Uprednom analizom rezultata datih u tabeli (1) i (2) pokazuje da je za  $7.28 - 19.28\%$  veći eksergijski stepen korisnosti procesa gasifikacije.

## 5. Razmenjena količina toplote

Razmenjena količina toplote pri sagorevanju biomase i odgovarajućeg gasovitog goriva određena je kalorimetrijskom temperaturom sagorevanja i karakteristikama ložišnog prostora. Viša kalorimetrijska temperatura sagorevanja intenzivira razmenu toplote zračenjem, a niža temperatura pogoduje konvektivnoj razmeni toplote. Na osnove teorijskih i eksperimentalnih rezultata dobijenih u procesu istosmerne gasifikacije može se zaključiti da se sagorevanjem gasa iz biomase mogu postići više kalorimetrijske temperature sagorevanja, odnosno veća razmenjena toplota zračenjem što se pozitivno odražava na sniženje temperature izlaznih produkata. Viša alorimetrijska temperatura

sagorevanja uslovljava povećano topotno opterećenje ložišnog prostora što se direktno odražava na smanjenje grejnih površina postrojenja.

## 6. Zaključak

Prethodna analiza pokazuje da se sagorevanjem gasovitog goriva koje nastaje u procesu istosmerne gasifikacije biomase na atmosferskom pritisku može za 7.28 – 19.28 % postići veći eksergijski stepen korisnosti nego pri direktnom sagorevanju pri promeni koeficijenta viška vazduha od 1.6 do 2.6 za biomasu odnosno 1.05 do 1.25 za gasovito gorivo, uz već poznate prednosti sagorevanja gasovitog goriva:

- lako vođenje i regulisanje procesa,
- mogućnost korišćenja vlage sadržane u biomasi koja raspadanjem u procesu gasifikacije smanjuje količinu kiseonika (vazduha) za obavljanje reakcije sagorevanja i
- smanjenje naknadnih grejnih površina smanjenjem zapremine gasovitih produkata.

Na osnovu uporedne analize može se zaključiti da termičku transformaciju biomase treba obaviti nakon potpune gasifikacije u reaktorima istosmernog toka na atmosferskom pritisku, i naknadnim sagorevanjem gasa u spergnutom sistemu istosmerni reaktor – ložište za sagorevanje.

## 7. Korišćene oznake

$H_p [kJ]$  - entalpija gasovitih produkata ,

$H_0 [kJ]$  - entalpija gasovitih produkata sagorevanja na pritisku  $p_0$  i temperaturi  $T_0$  ,

$T_0 [K]$  - temperatura okoline,

$S_p [kJ / K]$  - entropija gasovitih produkata i

$S_0 [kJ / K]$  - entropija gasovitih produkata sagorevanja na pritisku  $p_0$  i temperaturi  $T_0$  .

## **8. Literatura**

- [1] ĐURIĆ, V., BOGNER, M.: *Parni kotlovi*, Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [2] KARAMARKOVIĆ, V.: *Prilog proučavanju gasifikacije drvnih otpadaka*, Mašinski fakultet, Beograd, 1987.
- [3] CRAIG, K., MANN, K.: *Cost and Performance of Biomass-based Integrated Gasification Combined Cycle System*, National Renewable Energy Laboratory, 1996.
- [4] WILTSEE, G., KORENS, N., WILHELM, D.: *Biomass and Waste-Fired Power Plant Performance and Cost*, Paolo Alto, 1996.