

Ана Жбоџар¹, Сивеван Немода¹, Александар Ерић¹
Милић Ерић¹, Мирко Комашина²

¹ Институт за нуклеарне науке „Винча”, Београд

² Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд

Испитивање процеса гасификације биомасе у флуидизованом слоју

Оригинални научни рад

UDC: 662.636/.638:66.011

BIBLID: 350-218X, 30 (2004), 1-4, 5-22

Процес гасификације биомасе постоје све значајнија тема развојних истраживања у енергетици и процесној техници. Биомаса се сматра обновљивим и „CO₂-неутралним” горивом, чијом се гасификацијом може добити гас применљив у различите сврхе.

У оквиру пројекта Националног програма енергетске ефикасности истраживан је процес гасификације биомасе (дрво, окласак кукуруза), као обновљиво, лако доступно и јефтино реактивно. Циљ истраживања је формулација и конструкција пилот-установе за гасификацију биомасе у флуидизованом слоју инертног материјала, као основе за ширу индустријску примену ове технологије.

Процес гасификације биомасе истраживан је експериментално и теоријски, да би се одредили састав продуката, кинетика процеса, и оптимални услови одвијања процеса. Састав продуката и кинетика процеса одређивани су експериментално, у лабораторијском реактору са флуидизованим слојем. Математички модел гасификације обухвата хемијско-кинетичку карактеризацију, енергетске и материјалне билансе процеса, и хидродинамичке карактеристике реактора са флуидизованим слојем. Добијени резултати се могу искористити за оптимизацију процеса гасификације биомасе у циљу добијања квалитативно и квантитативно оптималног приноса гасовитог производа.

Кључне речи: биомаса, гасификација, флуидизовани слој, оптимизација

Увод

Сагоревање фосилних горива представља главни вештачки извор емисије CO₂ у атмосферу, гаса који значајно доприноси глобалном загревању планете. С друге стране, биомаса се сматра „CO₂ неутралним” горивом, јер су количине CO₂ коју

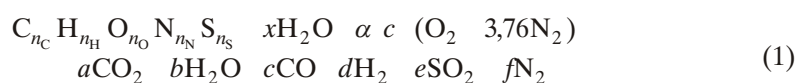
биљке абсорбују током живота и који се ослободи током њиховог сагоревања једнаки. Биомаса је обновљиво гориво, што је чини пожељним енергентом будућности. Као гориво најчешће се користе дрво и пољопривредни остаци. Окласак кукуруза (кочанка) је у нашем окружењу чест отпад из пољопривреде, који би се могао рационално користити као гориво.

Биомаса је специфична по свом саставу [1–3], који се разликује од састава традиционално коришћених фосилних горива (угаљ, нафта). Биомаса има мању топлотну моћ у односу на фосилна горива, али и значајно мањи садржај сумпора. Садржај испарљивих горивих материјала у биомаси је висок, што утиче на процес сагоревања. Такође, значајна је и количина калијума и хлора у минералном делу биомасе – пепелу, који утичу на понашање пепела насталог сагоревањем биомасе.

Гасификација је термохемијски процес конверзије чврстог у гасовито гориво. Главни производи гасификације су: CO, H₂, CO₂ и C_nH_m (негасификовани продукт пиролизе). Састав добијеног гасовитог производа зависи од: типа гасификатора, карактеристике горивог дела биомасе, садржаја влаге у биомаси, температуре гасификације, врсте оксиданта и додавања водене паре. Предности гасификације биомасе су: (1) употреба биомасе, (2) производња гаса, који може да се примени у различите сврхе, и (3) мањи штетни утицај производа гасификације на животну средину у односу на продукте сагоревања и пиролизе фосилних горива.

Процес гасификације се одвија на 500–1000 °C [4], при концентрацијама кисеоника које не дозвољавају да се процес сагоревања развије и тиме утроши сва горива материја. Процес се састоји из три фазе: (1) сушење горива, (2) пиролиза, и (3) гасификација. Производи пиролизе су гасови, од којих су неки при нормалним условима кондензибилни, а неки не, и чврсти коксни остатак. Принос ових производа зависи од температуре. Кондензибилни гасови, познатији као „тер”, су угљоводоници молекулске масе веће од бензена, са температуром кључања изнад 150 °C. Трећа фаза односи се на гасификацију коксног остатка, тј. конверзију чврстог горивог дела у гасовито гориво. Пиролиза је знатно бржи процес од гасификације, тако да је гасификација коксног остатка контролишућа фаза брзине одвијања целокупног процеса гасификације.

Гасификација биомасе може да се представи једначином непотпуног сагоревања уопштеног молекула горива рачунато по 1 kg биомасе, при чему се узима у обзир да у продуктима сагоревања нема кисеоника:



где су: α – коефицијент вишка ваздуха, n_i – број атома хемијске врсте i у ефективном молекулу биомасе без влаге и пепела, a , b , c , d , e и f – стехиометријски бројеви молекула за одговарајуће компоненте продуката реакције. Стехиометријски број c' одговара броју молекула кисеоника при потпуном сагоревању, који се одређује из материјалног биланса стехиометријске једначине потпуног сагоревања 1 kg биомасе ($\alpha = 1$). Треба додати да у продукте гасификације спадају и несагорели угљоводоници, који настају у процесу пиролизе, а који нису сагорели даљим повећањем температуре при гасификацији.

Иако је гасификација као процес конверзије позната више од 100 година, тек у последњих двадесетак година расте интересовање за примену *гасификације биомасе*, што се огледа у изградњи већег броја лабораторијских, пилот- и демонстрационих постројења. Гасификација биомасе нуди виши степен корисности процеса при производњи електричне енергије у гасним турбинама од класичних постројења са сагоревањем биомасе и парним циклусом, и омогућава знатно ниже емисије штетних гасова и честица.

Гасификациони са флуидизованим слојем садрже инертни материјал који стабилизује температурне промене и омогућава интензивнији контакт горива са средином у реактору, услед чега се постиже велика брзина реакције. Предност реактора са флуидизованим слојем је што омогућава ефикасан рад са горивима различите влажности, квалитета и величине. У гасификаторима са флуидизованим слојем процеси се одвијају на приближно константној температури, у опсегу 800–850 °C. Највећи део процеса конверзије горива се одвија у слоју, док се у зони изнад слоја углавном одвија разградња тврста у лакше угљоводонике. Степен конверзије угљеника достиже скоро 100%, мада се јавља изношење честица коксног остатка ван реактора са флуидизованим слојем.

Најчешћи *проблем* технологије са флуидизованим слојем је синтеровање инертног материјала, што је посебно изражено при раду са биомасом. Пепео биомасе садржи високе концентрације алкалних метала, чији оксиди стварају нискотопиве еутектичке смеше (испод 800 °C) са кварцим песком (најчешће коришћени инертни материјал). Синтеровање или агломерација честица инертног материјала доводи до блокирања флуидизације и заустављања рада реактора. Проблем синтеровања може да се реши заменом кварцног песка материјалом који не ствара нискотопиве еутектичке смеше са алкалним металима из пепела, нпр. хематитом [5].

За потребе развоја технологије и уређаја за гасификацију биомасе у флуидизованом слоју, потребно је усмерити истраживања у следећим правцима:

- одређивање хемијског састава продуката гасификације и енергетског биланса процеса,
- одређивање хемијско-кинетичких карактеристика гасификације биомасе (што је ограничавајућа компонента у кинетици укупног процеса), и
- дефинисање хидродинамичких карактеристика реактора са флуидизованим слојем.

У овом раду описана је експериментална анализа гасификације биомасе у флуидизованом слоју и формулација модела гасификације, који ће послужити развоју ове технологије. Састав гасовитог производа и кинетика гасификације кочанке експериментално су одређивани у шаржном лабораторијском гасификатору са флуидизованим слојем. Формулисани математички модел обухвата хемијско-кинетичку карактеризацију, енергетске и материјалне билансе процеса и хидродинамичке карактеристике реактора са флуидизованим слојем.

Кинетички параметри гасификације биомасе

Имајући у виду комплексност процеса гасификације, тешко је одредити једноставан, а свеобухватан метод за одређивање кинетике гасификације биомасе.

Ипак, већина истраживања описаних у литератури [6–8] заснива се на упрошћеном приступу по аналогији са брзином хемијске реакције првог реда:

$$\frac{dw}{d\tau} = kw \quad (2)$$

при чему су: k – константа брзине реакције, w – масени удео непрореаговалог материјала после времена τ . Израз за константу брзине реакције дефинише се помоћу Аренијусовог (Arrhenius) закона:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

где је A – предекспоненцијални фактор, E_a – енергија активације, R – универзална гасна константа и T – температура. Према једн. (2), константа брзине реакције може једноставно да се одреди експериментално, праћењем губитка масе узорка у времену.

Код хомогених реакција, константе A и E_a зависе само од особина реактанта, а понекад се узима у обзир и зависност A од температуре. Код хетерогених реакција, као што је случај са гасификацијом биомасе, константе A и E_a морају обухватати и утицаје везане за интензитет преноса топлоте и масе, који зависе од величине комада биомасе, интензитета прелаза топлоте са околног медијума (флуидизовани слој) на комаде биомасе, специфичне површине реагујућих комада биомасе итд. Константа брзине реакције зависи само од температуре.

За потребе пројектовања и конструисања лабораторијских и индустријских гасификатора, неопходно је познавати брзину реакције за сваки тип горива, и режим и услове одвијања процеса. У литератури се могу наћи подаци за константе A и E_a за угљеве [9, 10], док су за биомасу подаци оскудни и махом се односе на лабораторијске услове одвијања процеса у струји инертног гаса [11] или мешавини CO_2 и водене паре. Такође су ретки и подаци за брзине процеса гасификације у флуидизованом слоју. С друге стране, за формирање лабораторијске апаратуре је неопходно бар оквирно познавати кинетику процеса који се испитује.

Експеримент

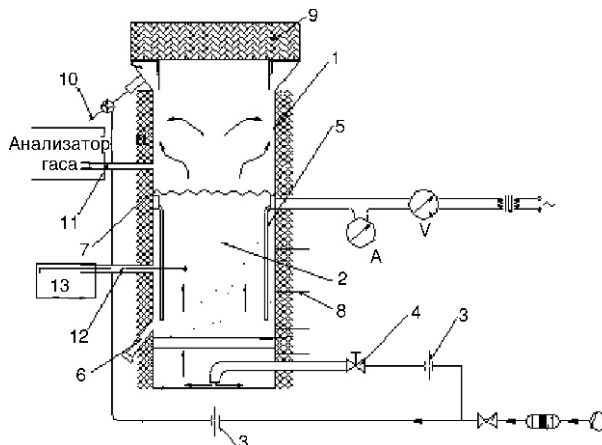
Лабораторијски гасификатор са флуидизованим слојем, приказан на сл. 1, има челични реактор пречника 0,2 m и капацитет од око 700 g горива на час. Релативно велике димензије радног простора и капацитет ове лабораторијске апаратуре омогућавају симулирање услова блиским онима који владају у индустријским реакторима. Овакав реактор пружа могућност праћења ефеката мешања и процеса преноса топлоте и масе у флуидизованом слоју, који садржи већи број комада биомасе у сваком тренутку рада реактора.

Мерна опрема обухвата апаратуру за праћење температуре у реактору и мерење протока ваздуха за флуидизацију, и уређаје за анализу гасова и аквизицију измерених података. Пратећа инсталациона опрема обухвата опрему за снабдевање и регулацију грејача електричном енергијом и систем за одвођење димних гасова.

Проток улазног ваздуха за флуидизацију, температуре приближно 25 °C, регулише се преко мерне бленде (3) и вентила (4). Флуидизовани слој се загрева

Слика 1. Шема лабораторијског гасификатора биомасе

- 1 – суд за флуидизацију
- 2 – слој честица корунда
- 3 – бленда за мерења притока ваздуха
- 4 – лоптичasti венџил
- 5 – електрични грејачи
- 6 – цев за израђење суда
- 7 – шпайлоуина изолација
- 8 – изводи за мерење притиска
- 9 – поклопац
- 10 – линија за одвођење гаса
- 11 – линија за анализу гаса
- 12 – термопар
- 13 – аквизиција температуре



помоћу два електроотпорна грејача (5) укупне снаге 3 kW, који су уроњени у слој. Као инертни материјал за флуидизацију коришћене су честице корунда средњег пречника 350 μm . Избор пречника инертног материјала је веома важан за овај процес. Обично се користе честице финијих гранулација него код ложишта са потпуним сагоревањем, јер на тај начин могу да се обезбеде довољно високи степени флуидизације, а да се при томе користе мале брзине (тј. мањи проток) ваздуха за флуидизацију, због остваривања услова непотпуног сагоревања. С друге стране, сувише fine гранулације инертног материјала нису пожељне због могућих појава каналне флуидизације и лакшег синтеровања честица са пепелом.

Суд за флуидизацију (1) је затворен са горње стране поклопцем, при чему димни гасови из реактора излазе ка систему за извлачење гасова. Линија за анализу гаса (11) обухвата континуално узорковање, кондиционирање и анализирање гаса добијеног процесом гасификације биомасе у лабораторијском реактору. Линију чине сонда за узимање узорка гаса, груби филтер, грејано црево, грејани филтер, кондиционер и анализатори гаса.

Експериментални поступак

Када се флуидизовани слој у реактору, (сл. 1), загреје до радне температуре, у реактор се убацује шаржа кочанке масе 300 g, и димензија комада приближно 2 \times 2 cm. Непосредно пре убацивања шарже, почиње континуално праћење састава излазних гасова. Да би се избегао низ проблема везаних за континуално дозирање биомасе, а посебно могућност уласка додатног ваздуха у радни простор, прибегло се континуалној промени протока ваздуха који се доводи у реактор, а који служи истовремено за флуидизацију и за гасификацију. Промена протока се обавља ручно, на основу праћења показивања гасног анализатора. Идеја је да се на основу познатог елемен-

тарног састава биомасе прорачуном одреди приближан састав излазног гаса, при одређеном вишку ваздуха ($\alpha = 0,5$) и температури (550 °C). Смањивањем протока ваздуха током одвијања експеримента вредности концентрација CO и CO₂ у гасном продукту треба одржати приближно константним, тако да одговарају коефицијенту вишка ваздуха од 0,5. На тај начин промена протока ваздуха у времену, при константним условима одвијања процеса, пружа директан податак о промени масе шарже биомасе у времену. Овај приступ је могућ све док се не утроши сва горива материја, или када даље смањење протока ваздуха доводи до престанка флуидизације.

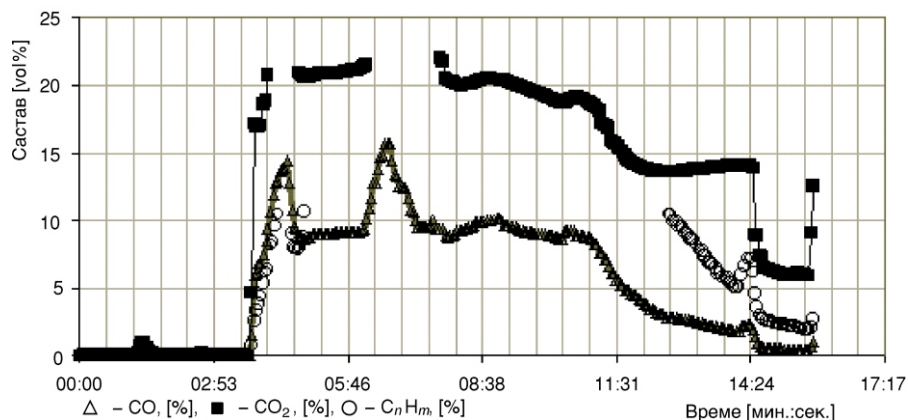
Ради обезбеђивања константног вишка ваздуха и тиме континуалности процеса гасификације, проток ваздуха је смањиван тако да се степен флуидизације мењао од 7 до 2. Због техничких ограничења, експерименти су рађени на температури од приближно 530 °C, што одговара гасификацији на нижим температурама [4].

Експериментални резултати

Добијени резултати приказани су на сл. 2 и представљају састав гаса добијеног гасификацијом једне шарже горива од 300 g. Карактеристични резултати серије мерења показују да се гасификацијом комада кочанке на 500 °C може добити гас следећег састава:

$$\begin{aligned} X_{\text{CO}_2} &= 0,20, \\ X_{\text{CO}} &= 0,10, \text{ и} \\ X_{\text{C}_n\text{H}_m} &= 0,10 \text{ (изван мерног опсега инструмента),} \end{aligned}$$

где X представља запремински проценат компоненте i у узоркованом гасу из кога је одстрањена вода.



Слика 2. Промена састава гасног продукта са временом

Одређивање кинетичке процеса

На основу једн. (1) и масених биланса за сваку атомску врсту која се налази у молекулу биомасе [12], може да се одреди веза између масеног протока ваздуха за гасификацију и масеног протока примарног горива (биомасе):

$$\dot{m}_{pg} = \frac{\dot{m}_v}{\alpha c (M_{O_2} + 3,76M_{N_2})} \quad (4)$$

Како је већ наглашено, да би се остварили константни услови одвијања процеса шаржне гасификације, потребно је смањивати проток ваздуха у времену одређеном динамиком, што је последица смањивања протока масе примарног горива (шарже биомасе). Другим речима, масени проток примарног горива одговара брзини конверзије шарже биомасе:

$$\dot{m}_{pg} = km_0w \quad (5)$$

где је m_0 – почетна маса шарже.

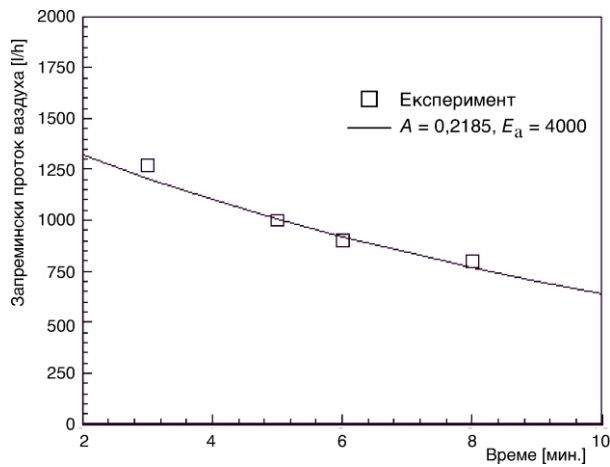
На основу изнетих напомена, промена масеног протока биомасе која реагује може да се изрази применом једн. (3) и (5), на следећи начин:

$$\dot{m}_{pg} = km_0e^{-\tau k} \quad (6)$$

Применом израза (6) и измерених података о промени масеног протока реагујуће биомасе у времену, која се одређује на основу промене концентрације компонената у произведеном гасу, могуће је одредити коефицијент брзине испитиване реакције. Описана анализа показује да брзина гасификације комада кочанке на температури од 530 °C и при вишку ваздуха 0,5 износи $k = 0,0015$ 1/s.

У складу са закључцима из рада [6] може да се претпостави да је енергија активације гасификације кочанке приближно једнака енергији активације дрвета. Усвајајући ову претпоставку и узимајући да је $E_a = 4000$ J/mol (у складу са [6]) на основу измерене вредности за брзину реакције добија се да предекспоненцијални фактор за дате услове реакције износи: $A = 0,2185$ 1/s. На сл. 3. приказано је поређење резултата експеримената са усвојеном кинетиком одвијања испитиваног процеса гасификације, при $t = 530$ °C, $\alpha = 0,50$, $X_{CO_2} = 17,724$, $X_{CO} = 9,775$ и $X_{H_2} = 15,121$.

Добијени резултати знатно одступају у односу на раније експерименте [6], у којима је гасификовано дрво у фиксном слоју. Предекспоненцијални фактор A је за ред величине виши у односу на сет експерименталних резултата приказаних у [6], иако разлика у величини коришћених комада горива није значајна. Како је закључено у раду [6], евидентан је утицај дифузије, дакле величине комада и структуре чврстог горива, на вредност предекспоненцијалног фактора. Дакле, разлози за различите вредности брзине реакције су пре свега битне разлике у структури два горива, тј.



Слика 3. Поређење експерименталних података са усвојеном кинетиком

дрвета и кочанке. За разлику од дрвета, окласак кукуруза је мање калоријске вредности, али јако порозан и са великом активном површином.

Моделовање процеса гасификације

Прорачун састава продуката гасификације

Теоријски састав продуката гасификације може да се одреди помоћу једн. (1). Број атома n_i у ефективном молекулу биомасе може да се одреди на основу података елементарне и техничке анализе биомасе, које даје масене уделе атомских врста С, Н, О, N и S (y_v) и пепела (y_p) у укупној маси горива. Масени удели атомских врста С, Н, N, N и S у делу биомасе без влаге и пепела може да се изрази као:

$$y_i \frac{y_i m}{m} \frac{y_i m}{(y_C y_H y_O y_N y_S) m} \frac{y_i}{y_C y_H y_O y_N y_S} \quad (7)$$

где су m' и m масе укупног комада биомасе и масе без влаге и пепела, респективно. Сви материјални биланси у прорачуну се базирају на маси биомасе (са влагом и пепелом) од 1 kg ($m' = 1$ kg), па је: $m = (y_C y_H y_O y_N y_S) m'$. Број атома хемијске врсте i у ефективном молекулу биомасе без влаге и пепела се могу изразити на следећи начин:

$$n_i \frac{y_i m}{A_i} \quad (8)$$

где је A_i атомска маса хемијске врсте i . Број молекула воде у 1 kg биомасе x се дефинише помоћу следећег израза:

$$x \frac{y_v}{M_{H_2O}} \quad (9)$$

На основу стехиометријске једн. (1) могу да се поставе масени биланси за сваку атомску врсту у молекулу биомасе:

$$\text{Биланс за угљеник: } n_C = a + c \quad (10a)$$

$$\text{Биланс за водоник: } n_H = 2x = 2b + 2d \quad (10б)$$

$$\text{Биланс за кисеоник: } n_O + x + 2\alpha \cdot c' = 2a + 2b + C + 2e \quad (10в)$$

$$\text{Биланс за сумптор: } n_S = e \quad (10г)$$

$$\text{Биланс за азот: } n_N + 2 \cdot 3,76\alpha \cdot c = 2f \quad (10д)$$

Постављањем једначина материјалног биланса компонената и хемијске равнотеже између најреактивнијих компонената продуката [12, 13], теоријски може да се предвиди састав добијеног гаса.

Продукти непотпуног сагоревања – десна страна материјалног биланса (1) – састоје се од 6 компоненти које садрже 5 атомских врста, па се зато и систем једначина састоји од 5 једначина са 6 непознатих. Да би се формирала још једна једначина, неопходна за употпуњавање система једначина материјалног биланса, потребно је применити израз за хемијску равнотежу између најреактивнијих компонената продуката сагоревања:

$$a\text{CO}_2 \quad d\text{H}_2 \quad c\text{CO} \quad b\text{H}_2\text{O} \quad (11)$$

где је константа хемијске равнотеже K :

$$K = \frac{c \cdot b}{a \cdot d} \quad (12)$$

Константа хемијске равнотеже може да се одреди на основу Вант Хоффовог (Van't Hoff) израза:

$$\frac{d(\ln K)}{dT} = \frac{H}{RT^2} \quad (13)$$

где је ΔH промена енталпије реакције, која је доступна из литературе [14]. Решавањем наведеног система једначина добијају се бројеви молова (a, b, c, d, e, f) свих компоненти у стехиометријској једн. (1), за сагоревање 1 kg биомасе.

Прорачун теоријске температуре сагоревања

Адијабатска температура сагоревања је температура коју при адијабатским условима процеса достижу продукти сагоревања. Да би се добила стварна температура сагоревања потребно је још узети у обзир вишак ваздуха, ефекте мешања и

интензитет размене топлоте са околином. Прелиминарни прорачун занемарује струјање, дифузију масе и пренос топлоте, а заснива се на следећим претпоставкама: (1) процес сагоревања се одвија адијабатски, (2) ваздух и гориво су идеално измешани, и (3) не узимају се у обзир ефекти дисоцијације [12].

Прорачун адијабатске температуре сагоревања се базира на топлотном билансу, тј. на једнакости укупних енталпија гориве смеше и продуката сагоревања:

$$Q_d = \sum_{i \text{ reakt}} v_i \int_{298}^{T_i} c_{p,i} dT - \sum_{j \text{ prod}} v_j \int_{298}^{T_s} c_{p,j} dT \quad (14)$$

где је Q_d – доња топлотна моћ горива, v – стехиометријски коефицијент према једначини (1), c_p – топлотни капацитет, T_s – температура сагоревања, а индекси i и j означавају реактанте и продукте процеса, респективно. Пошто се сагоревање у котловима малих снага одвија при константном притиску, овде ће бити разматран само прорачун за услове сагоревања на атмосферском притиску.

Када се разматра непотпуно сагоревање, као код процеса гасификације, потребно је кориговати топлотни ефекат хемијских реакција. То се најједноставније може урадити кориговањем ефективне топлотне моћи горива на основу удела угљеникових и водоникових атома који су прореаговали до CO_2 , односно H_2O :

$$Q_d = [340 y'_C \psi_C + 1030 y'_H \psi_H - 109 (y'_O - y'_S) - 25 y'_V] 100 \quad (15)$$

при чему је:

$$\psi_C = \frac{aM_{\text{CO}_2}}{aM_{\text{CO}_2} + cM_{\text{CO}}} \quad (16a)$$

$$\psi_H = \frac{bM_{\text{H}_2\text{O}}}{bM_{\text{H}_2\text{O}} + dM_{\text{H}_2}} \quad (16b)$$

Кинетички параметри гасификације биомасе

Примењујући једн. (2), може да се одреди време потребно за конверзију при хемијској реакцији првог реда:

$$\tau = \frac{1}{k} \ln \frac{w_0}{w} \quad (17)$$

при чему је w_0 – масени удео непрореаговалог материјала у тренутку $\tau = 0$ (изузимајући садржај пепела), и w – масени удео неиздвојеног материјала после времена τ . Константа брзине реакције се одређује помоћу Аренијусовог закона.

Према једн. (17), константа брзине реакције може једноставно експериментално да се одреди праћењем губитка масе узорка у времену, као што је већ описано. Такође, константе у Аренијусовом изразу (A , E_a) могу да се одреде помоћу вредности константе брзине реакције за различите температуре одвијања процеса, али то у овом раду није остварено.

Хидродинамичке карактеристике реактора са флуидизованим слојем

Адекватно дефинисање хидродинамичких карактеристика флуидизованог слоја је веома значајно, јер је потребно поред предвиђања ефикасног мешања, узети у обзир и ограничења за проток ваздуха због обезбеђења слабооксидујуће атмосфере. Другим речима, потребно је истовремено ускладити добро мешање у слоју и жељени вишак ваздуха. Да би се то остварило потребно је узети у обзир факторе који дефинишу интензитет мешања инертног материјала флуидизованог слоја, на основу којих се оптимизује режим флуидизације.

Минимална брзина флуидизације (U_{mf}) је један од најважнијих параметара потребних за избор оптималног режима рада реактора са флуидизованим слојем. Мехури у флуидизованом слоју су основни носилац мешања инертног материјала, а разлика ($U - U_{mf}$) се узима као мера интензитета мешања честица [15]. Ипак, широм је усвојено да се тзв. степен флуидизације (N_f) користи као мерило интензитета флуидизације, који представља однос U/U_{mf} .

Пошто минимална брзина флуидизације по дефиницији одговара брзини када честице почињу да лебде, то се U_{mf} може рачунски одредити изједначавањем сила трења флуида који струји кроз слој честица са силом теже овог слоја. Најефикаснији модели, засновани на оваквој анализи, имају следећи облик:

$$Re_{mf} = (a^2 + bAr)^{0,5} \cdot a \quad (18)$$

где су: Ar – Архимедов број, а a и b – константе семиемпиријске зависности. У једн. (15) се могу наћи различите вредности за константе a и b , где се a углавном креће од 9 до 33, док b може бити између 0,02 и 0,049.

Параметри за оцену ефикасности гасификације

Применом предложених математичких модела хемијског састава продуката гасификације, енергетског биланса и кинетичких карактеристика процеса, и хидродинамичких карактеристика реактора са флуидизованим слојем, могуће је анализирати концепт гасификатора заснованих на непотпуном сагоревању биомасе у флуидизованом слоју честица инертног материјала. С тачке гледишта развоја и пројектовања гасификатора потребно је обавити процене могућих капацитета и снаге, које гасификатор може да оствари при различитим режимима рада.

Применом наведених модела може да се одреди зависност равнотежних састава продуката гасификације од температуре, за одређену вредност вишка ваздуха. Равнотежни састав продуката гасификације пружа податак о топлотној моћи добијене смеше гасова, при различитим режимима гасификације. Такође, на основу познате хемијске кинетике процеса и хидродинамичких карактеристика флуидизованог слоја, могуће је проценити специфичну снагу добијеног протока гасовитог горива за одре-

ђени вишак ваздуха и радну температуру. Доња топлотна моћ добијене смеше гасова, $Q_{d,g}$, добијеног гасификовањем 1 kg биомасе, може да се одреди из једначине:

$$Q_{d,g} = cM_{CO}Q_{d,CO} + dM_{H_2}Q_{d,H_2} \quad (19)$$

где су: c и d – стехиометријски коефицијенти у једн. (1), M – моларна маса, и $Q_{d,CO}$ и Q_{d,H_2} – доње топлотне моћи угљен-монооксида и водоника.

Специфична снага продуката непотпуног сагоревања биомасе може да се дефинише као производ топлотне моћи продуката гасификације, Q_d и масеног протока биомасе, \dot{m}_{pg} по 1 m³ флуидизованог слоја, V_{FS} :

$$W = \frac{\dot{m}_{pg}Q_d}{V_{FS}} \quad (20)$$

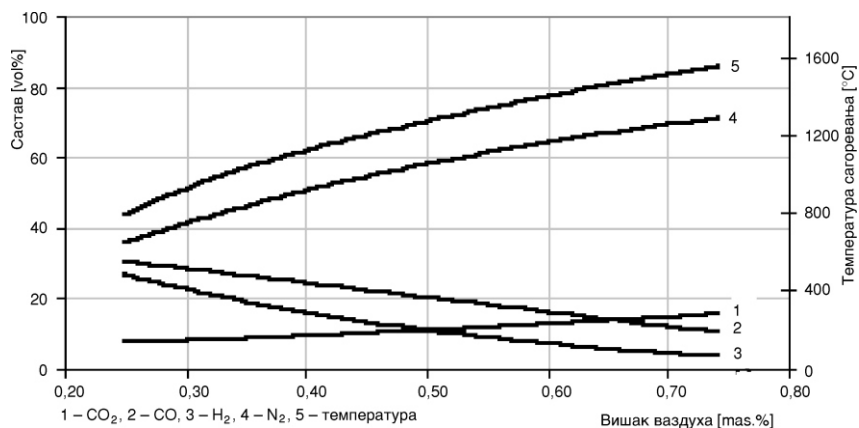
Масени проток биомасе се одређује на основу брзине реакције гасификације и искуственог податка да је, са становишта оптималног рада флуидизованих реактора препоручени удео чврстог горива у маси флуидизованог слоја око 5%.

Ефикасност процеса гасификације може да се одреди као однос доње топлотне моћи добијеног гасовитог горива и доње топлотне моћи горива када се оно у основном (чврстом) облику сагорева:

$$\eta_g = \frac{Q_{d,g}}{Q_{d,s}} \quad (21)$$

Параметрална анализа модела

Описани модел омогућава одређивање састава гаса, добијеног гасификацијом биомасе и енергетски биланс процеса, при чему морају да буду познате вредности



Слика 4. Теоријска температура сагоревања и запремински удели продуката гасификације кочанке, у зависности од коефицијента вишка ваздуха

масених удела свих елемената, влаге и пепела у гориву. Масени удели елемената у гориву које се разматра, као и удели влаге и пепела у сировом узорку горива дат је у табл. 1. На сл. 4 су приказани запремински удели CO_2 , CO , H_2 и N_2 у сувом продукту гасификације кочанке, и теоријска температура сагоревања у зависности од коефицијента вишка ваздуха.

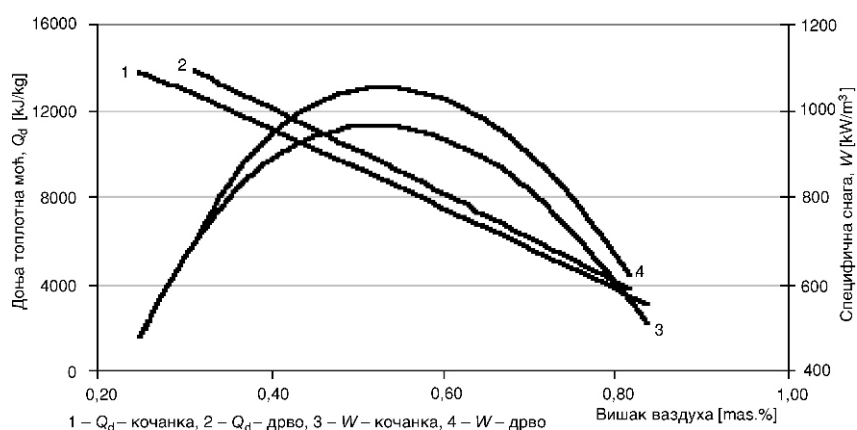
Таблица 1. Елементарни и технички састав букве и кочанке [13]

Гориво	C	H	O	N	S	Влага	Пепео
	[%мас. у чистом гориву]					[%мас. у сировом узорку]	
Дрво (буква)	48,6	6,11	44,62	0,65	0	7,4	2
Кочанка	46,5	5,94	46,8	0,74	0,02	8	2,4

Удели CO и H_2 се смањују са повећањем удела ваздуха (кисеоника) у смеши, јер долази до потпунијег сагоревања. Удео азота, инертног гаса у ваздуху, у добијеном гасу је највећи, што директно смањује топлотну моћ гаса. То је разлог због којег се гасификација често одвија у струји кисеоника, уместо у струји ваздуха.

Помоћу хемијска кинетике процеса и хидродинамичке карактеристике флуидизованог слоја могуће је проценити специфичну снагу добијеног протока гасовитог горива – једн. (20) – за одређени вишак ваздуха и радну температуру. Зависност доње топлотне моћи и специфична снага продуката гасификације приказана је на сл. 5.

На сл. 5 видимо да се на кривој зависности специфичне снаге од вишка ваздуха јавља максимум, за вредност вишка ваздуха $\alpha = 0,5-0,6$. Максимум се јавља услед истовременог раста вредности потребног масеног протока горива са порастом вишка

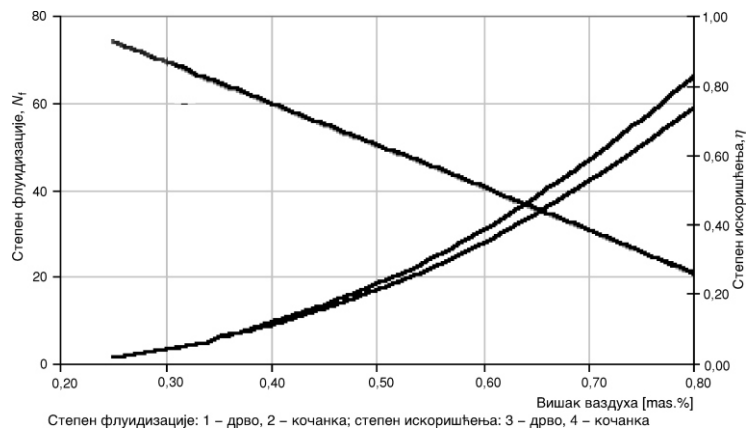


Слика 5. Зависност доње топлотне моћи и специфичне снаге добијеног гаса од вишка ваздуха за букву и кочанку

ваздуха, и смањења вредности топлотне моћи добијеног гаса (због смањења удела CO и H₂ у добијеном гасу).

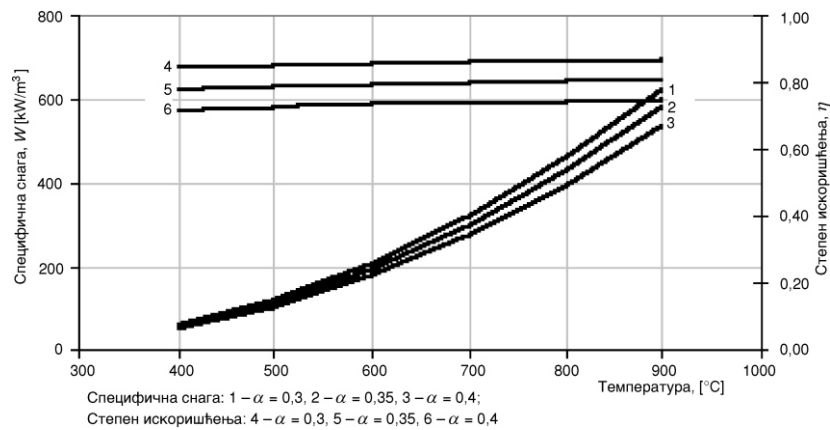
На сл. 6 приказани су степен флуидизације, рачунат према кинетици гасификације, и ефикасност процеса гасификације, рачунат из једн. (21), у зависности од вишка ваздуха, за дрво и кочанку.

Може се уочити да степен флуидизације интензивно расте са повећањем вишка ваздуха, али са овом величином може да се манипулише прилагођавањем пречника реактора.



Слика 6. Степен искоришћења процеса гасификације и степен флуидизације у зависности од вишка ваздуха за дрво и кочанку

Предвиђени утицај температуре слоја на процес гасификације приказан је на сл. 7, кроз промену специфичне снаге добијеног гаса и ефикасности процеса, за



Слика 7. Утицај температуре на ефикасност процеса гасификације

вредности вишка ваздуха $\alpha = 0,30, 0,35$ и $0,40$. Ефикасност процеса благо расте са температуром, а опада са повећањем вишка ваздуха. Повећавањем вишка ваздуха долази и до повећања концентрације CO_2 , чиме сам процес гасификације губи на ефикасности. С друге стране, специфична снага добијеног гасног продукта благо опада са повећањем вишка ваздуха, али нагло расте са повећањем температуре, која директно утиче на брзину реакције.

Поређење модела и експеримената

Резултати поређења предложеног модела предвиђања састава гасификације биомасе са резултатима експеримента су приказани у табл. 2.

Таблица 2. Поређење експеримента и модела

Хемијска компонента	Експеримент [вол. % у сувом узорку гаса]	Модел [вол. % у сувом узорку гаса]
CO_2	20	17,7
CO	10	10,6
H_2	–	17,9
C_nH_m	>10	0

Како се из табл. 2. види, слагање резултата прорачуна и експеримента је релативно добро. Посебно се добро слаже прогноза издвојеног CO са стварном вредношћу. Одступање у вредностима концентрације CO_2 може да се доведе у везу са релативно неповољним условима гасификације (због ниске температуре), због чега се у експерименту јавља висок садржај метана и виших угљоводоника (C_nH_m), што моделом није узето у обзир.

Користећи резултате добијене моделом, може да се предвиди и топлотна моћ гаса добијеног описаним експериментом гасификације кочанке. Наиме, узимајући у обзир податке из десне колоне у табл. 2. може се рећи да топлотна моћ гаса (из кога је издвојена вода) добијеног описаним поступком, износи приближно $3,3 \text{ MJ/Nm}^3$.

Закључак

Процес гасификације биомасе испитиван је експериментално и теоријски, да би се одредили састав продуката, кинетика процеса и оптимални услови одвијања процеса. Експериментално одређивање састава продуката и кинетика процеса је обављено у шаржном лабораторијском реактору са флуидизованим слојем, где је манипулисањем протока ваздуха успешно остварена квази-континуалност процеса гасификације. Поређењем експерименталних резултата са теоријским прорачуном утврђено је да је могуће предвидети састав добијеног гаса са задовољавајућом тач-

ношћу, иако је на постигнутој ниској радној температури значајан удео несагорелих угљоводоника, који су продукти пиролизе. Из података о промени протока ваздуха за флуидизацију, који указују на промену шарже биомасе у експерименталном гасификатору, одређена је укупна кинетика процеса гасификације комада кочанке у флуидизованом слоју за постигнуту радну температуру.

Математички модел гасификације обухвата хемијско-кинетичку карактеризацију, енергетске и материјалне билансе процеса, и хидродинамичке карактеристике реактора са флуидизованим слојем. Такође, формулисани су и параметри за процену ефикасности процеса, тј. специфична снага добијеног гаса и ефикасности процеса гасификације. На температурној зависности специфичне снаге гасног продукта, која зависи од кинетике сагоревања и од топлотне моћи горива, уочава се појава максимума, који може да послужи као индикатор за одређивање оптималног режима гасификације. Добијени резултати могу да се искористе за оптимизацију процеса гасификације биомасе у циљу добијања квалитативно и квантитативно оптималног приноса гасовитог производа.

Захвалница

Овај рад је део пројекта „Развој технологије сагоревања и гасификације остатака биомасе ради ефикаснијег искоришћења локалних извора енергија” (НП ЕЕ401-99Б), финансираног од стране Министарства за науку и заштиту животне средине Републике Србије.

Ознаке

A	– предекспоненцијални фактор, [1/s]
a, b, c, d, e, f	– стехиометријски бројеви у реакцији (1), [–]
A_i	– атомска маса атомске врсте i [kg]
Ar	– Архимедов број [–]
c'	– стехиометријски број молекула кисеоника при потпуном сагоревању 1 kg биомасе, [–]
c_p	– топлотни капацитет, [kJ/kgK]
E_a	– енергија активације, [J/mol]
ΔH	– промена енталпије реакције, [kJ/kmol]
K	– константа хемијске равнотеже, [–]
k	– константа брзине реакције, [1/s]
M	– моларна маса, [kg/kmol]
m_0	– почетна маса шарже, [kg]
\dot{m}_{pg}	– масени проток горива, [kg/s]
\dot{m}_v	– масени проток ваздуха, [kg/s]
n_i	– број атома хемијске врсте i у ефективном молекулу биомасе без влаге и пепела, [–]
N_f	– степен флуидизације, [–]
Q_d	– доња топлотна моћ, [kJ/kg]
R	– универзална гасна константа, [kJ/kmolK]
Re_{mf}	– Рејнолдсов број при минималној брзини флуидизације, [–]
T	– температура, [K]
t	– температура, [C]
U_{mf}	– минимална брзина флуидизације, [m/s]
V_{FS}	– запремина флуидизованог слоја, [m ³]
W	– специфична снага продукта непотпуног сагоревања, [kW/m ³]
w	– масени удео непрореагавалог материјала после времена τ (без пепела), [–]

w_0	– масени удео неиздвојеног материјала у тренутку $\tau = 0$, [-]
X_i	– запремински удео компоненте i у узоркованом гасу (без воде), [-]
x	– број молова воде у 1 kg биомасе, [-]
y_i	– масени удео атомске врсте i у гориву, [-]
y_i	– масени удео атомске врсте i у гориву (без воде и пепела), [-]

Грчка слова

α	– коефицијент вишка ваздуха, [-]
η_g	– ефикасност процеса гасификације, [-]
ν	– уопштени стехиометријски коефицијент у једн. (1), [-]
τ	– време, [s]
ψ	– корекциони фактор, [-]

Индекси

g	– гас
i	– реактанти
j	– продукти
p	– пепео
s	– сагоревање
v	– вода

Литература

- [1] Биомаса као гориво – Могућности и ограничења, Монографија (ур. С. Ока, Љ. Јовановић), Југословенско друштво термичара и Институт за нуклеарне науке „Винча”, Београд, 1987
- [2] Арсић, Б., Ока, С., Сагоревање пресоване сламе и окласка клипа кукуруза у флуидизованом слоју, Интерни извештај ИБК-ИТЕ-319, Институт за нуклеарне науке „Винча”, Београд, 1981
- [3] Sander, B., Properties of Danish Biofuels and the Requirements for Power Production, *Biomass & Bioenergy*, 12 (1997), 3, 177-183
- [4] Jankes, G., Milovanović, N., Biomass Gasification in Small-Scale Units for the Use in Agricultural and Forestry in Serbia, *Thermal Science*, 5 (2001), 2, 49-57
- [5] Grubor, B. D., Oka, S. N., Ilić, M. S., Dakić, D. V., Arsić, B. T., Biomass FB Combustion – Bed Agglomeration Problems, *Proceedings* (ed. K. J. Heinschel), 13th International Conference on FBC, Orlando, FL, USA, May 7-10, 1995, 515-522
- [6] Гверо, П., Истраживање кинетике ослобађања горивих испарљивих материја дрвета, Магистарска теза, Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1997.
- [7] Гверо, П., Илић, М., Ока, С., Радовановић, М., Истраживање кинетике пиролизе дрвета у реактору са флуидизованим слојем, *Термотехника*, 23 (1997), 4, 345-412
- [8] Molina, A., Mandragon, F., Reactivity of Coal Gasification with Steam and CO₂, *Fuel*, 77 (1998), 15, 1813-1839
- [9] Hegerman, R., Huettinger, K. J., Kinetics of Brown Coal Gasification, Symposium on the Fundamentals of Gasification, April 9-14, 1989, Dallas, TX, USA, 22-29
- [10] Johnson, L. J., Kinetics of Coal Gasification: a Compilation of Research, John Wiley & Sons, New York, 1979
- [11] Гверо, П., Моделирање процеса деволатилизације биомасе, Докторска теза, Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2002
- [12] Немода, С., Ерић, М., Александрић, М., Теоретска температура и састав продуката сагоревања биомасе, Интерни извештај НИВ-ИТЕ-241, Институт за нуклеарне науке „Винча”, 2003, Београд
- [13] Немода, С., Ерић, М., Александрић, М., Концепција гасификације биомасе у флуидизованом слоју са подстехиометријском струјом ваздуха, Интерни извештај НИВ-ИТЕ-262, Институт за нуклеарне науке „Винча”, 2003, Београд

- [14] Јоксимовић-Тјапкин, С., Процеси сагоревања, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1987.
- [15] Ока, С., Сагоревање у флуидизованом слоју – Процеси и примена, Југословенско друштво термичара, Београд, 1994.

Abstract

Investigation of Biomass Gasification in a Fluidized Bed

by

*Ana ŽBOGAR¹, Stevan NEMODA¹, Aleksandar ERIĆ¹,
Milić ERIĆ¹, and Mirko KOMATINA²*

¹ VINČA Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia and Montenegro

² Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade,
Belgrade, Serbia and Montenegro

The process of biomass gasification is becoming a significant subject of developmental projects in energetics and process technology. Biomass is considered to be renewable and "CO₂-neutral" fuel, which gasification leads to production of gas that can be utilized for different purposes.

A project dealing with the gasification of biomass (wood, corn cobs), as a renewable, easily assecible and cheap reactant, was conducted as a part of National Energy Efficiency Program. The aim of the project is to formulate and construct pilot facility for biomass gasification in a fluidized bed of inert material, as a basis for a broader industrial application of this technology.

Biomass gasification was investigated experimentally and theoretically, in order to determine the product composition, the process kinetics, and the optimal process conditions. The product composition and the process kinetics are determined experimentally, in the laboratory fluidized bed gasifier. The mathematical model of gasification includes chemical-kinetics characterization, the energy and mass balances of the process, and the hydrodynamic characteristics of the fluidized-bed reactor. Obtained results can be used for optimization of biomass gasification process, for getting qualitatively and quantitatively optimal gas product yield.

Key words: biomass, gasification, fluidized bed, optimization

Одговорни аутор / Corresponding author (S. Nemoda)
E-mail: snemoda@vin.bg.ac.yu